

Faut-il travailler le sol ?

Acquis et innovations
pour une agriculture durable

J. Labreuche, F. Laurent, J. Roger-Estrade, coord.



VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Faut-il travailler le sol ?

Acquis et innovations pour une agriculture durable

Jérôme Labreuche, François Laurent, Jean Roger-Estrade,
Coordinateurs

Collection *Savoir-faire*

Les clémentiniers et autres petits agrumes
C. Jacquemond, F. Curk, M. Heuzet, coord.
2013, 368 p.

Torrents et rivières de montagne
Dynamique et aménagement
Recking, D. Richard, G. Degoutte, coord.
2013, 352 p.

Qualité du cacao
L'impact du traitement post-récolte
M. Barel
2013, 104 p.

Analyse de sensibilité et exploration de modèles
Application aux sciences de la nature et de l'environnement
R. Faivre, B. Looss, S. Mahévas, D. Makowski, H. Monod, éd.
2013, 352 p.

*Les auteurs remercient le GIS GC-HP2E
(Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales)
pour son soutien à l'organisation du colloque « Faut-il travailler le sol » du 3 avril 2014
qui a permis la réalisation de cet ouvrage.*

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex, France

Arvalis - Institut du végétal
3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris, France

© Éditions Quæ, Arvalis - Institut du végétal, 2014

ISBN Quæ : 978-2-7592-2194-3

ISBN Arvalis : 978-2-8179-0170-1

ISSN 1952-1251

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Introduction : Quelle place pour le travail du sol dans les enjeux de durabilité des futurs systèmes de culture?	7
 1. Importance du travail du sol, typologie des modes de mise en œuvre et panorama de ses effets sur le rendement des cultures.	11
Diversité des modes de travail du sol	14
Importance du non-labour en France	17
Effets du système de travail du sol sur les rendements	20
Conclusion.....	23
Références bibliographiques	24
 2. Travail du sol et rendement des cultures : conditions et modalités de mise en œuvre pour les principales espèces de grande culture.....	27
Le lit de semences	28
Les dispositifs étudiés	31
Résultats obtenus sur céréales à pailles.....	33
Résultats obtenus sur maïs.....	35
Résultats obtenus sur colza.....	37
Résultats obtenus sur tournesol.....	40
Résultats obtenus sur pommes de terre.....	41
Conclusion : synthèse de l'aptitude des cultures à être implantées sans labour.....	44
Références bibliographiques	47
 3. Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol	49
La dynamique de la structure en l'absence de travail du sol et de tassement	50
L'effet des tassements sur la structure du sol.....	52
La régénération par les agents naturels des sols tassés.	54
La régénération de la structure des sols par le travail du sol.	58
Conclusion	60
Références bibliographiques	61

4. Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone : compréhension des mécanismes et conséquences pour la gestion des pratiques agricoles ...	63
Travail du sol et flux d'azote	65
Travail du sol et stockage de carbone	73
Travail du sol et émissions de gaz à effet de serre.....	81
Conclusions	84
Références bibliographiques	85
 5. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique	89
Les effets du travail du sol sur les organismes vivants dans le sol	92
Les effets du travail du sol se conjuguent avec ceux d'autres pratiques culturales associées.....	98
Conclusion.....	108
Références bibliographiques	109
 6. Travail du sol et gestion de la flore adventice	113
Les adventices, une composante biotique diverse et variable	114
Une diversité de processus liés au travail du sol.....	115
L'indispensable faux semis	116
L'abandon du labour	118
L'abandon du travail du sol.....	122
Conclusion.....	123
Références bibliographiques	124
 7. Travail du sol et risques de transferts de produits phytosanitaires	127
Effets du travail du sol sur le devenir des pesticides dans les sols	128
Effets du travail du sol sur les transferts des pesticides.....	130
Méthodes et outils pour réduire les risques de transfert.....	135
Conclusions	138
Références bibliographiques	139
 8. La technique strip till	143
Historique de la technique	143
Positionnement de la technique	146
Les cultures concernées par la technique strip till.....	148
Résultats d'essai.....	149
Références bibliographiques	156

9. Le semis direct sur couverture végétale permanente	157
La gestion des résidus végétaux	158
Un équilibre structural fragile.....	160
Des rotations pour compenser l'absence de travail du sol.....	161
La destruction du couvert est un compromis	162
Références bibliographiques	167
 10. Évaluation des stratégies de travail du sol	
pour des exploitations agricoles en grandes cultures	169
Un essai de « micro-ferme » : pour s'approcher du fonctionnement d'une exploitation agricole ...	170
Des systèmes étudiés « toutes choses égales par ailleurs ».....	171
Une évaluation pluri-critères des techniques de travail du sol et des semis avec SYSTERRE®	172
Impact du type de travail du sol sur les performances techniques de l'exploitation et l'organisation des chantiers.....	174
Impact du type de travail du sol sur les performances économiques de l'exploitation	176
Impact du travail du sol sur les performances environnementales de l'exploitation	179
Effet sur le potentiel agronomique des parcelles.....	180
Conclusion	182
Références bibliographiques	183
 Synthèse et perspectives: « faut-il travailler le sol? »	185
 Liste des auteurs.....	189

Introduction

Quelle place pour le travail du sol dans les enjeux de durabilité des futurs systèmes de culture ?

F. LAURENT, G. RICHARD

Cet ouvrage rassemble un ensemble de communications originales qui – pour la plupart – ont fait l’objet d’exposés lors du colloque tenu le 3 avril 2014 à Paris¹.

L’organisation de cet événement est à porter au crédit du GIS Grandes Cultures à Hautes Performances Économiques et Environnementales (GIS GC-HP2E) qui au travers de ses membres Inra et Arvalis a décidé de traiter des enjeux de durabilité des systèmes de culture en s’interrogeant sur la place du travail du sol. En préalable à ce colloque plus de soixante experts de la chaîne Recherche – Développement s’étaient réunis à Boigneville fin 2012² pour d’une part faire l’état des connaissances concernant les effets du travail du sol sur les performances agronomiques, environnementales et économiques des systèmes de culture, et d’autre part éclairer la question du levier que peut constituer le travail du sol dans la nécessaire transformation de l’agriculture face aux différents enjeux de durabilité auxquels sont confrontés les systèmes agricoles. Le colloque de 2014 en constitue un prolongement pour porter à la connaissance du plus grand nombre les acquis les plus récents dans ce domaine. Il s’accompagne de l’édition de cet ouvrage pour transmettre ces connaissances au-delà du cercle des trois cent cinquante participants.

Au sein de l’itinéraire technique, le travail du sol joue un rôle central car il modifie l’ensemble des états du sol (au travers de ses composantes physique, organique, chimique et biologique), impactant ainsi à la fois la production végétale et les processus impliqués dans les transferts de composés vers l’hydrosphère ou l’atmosphère. Les décisions concernant le choix des outils et des dates d’intervention ont donc une importance considérable dans le raisonnement de l’itiné-

(1) «Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable»

(2) Remerciements à Helmut Meiss, missionné par le GIS GC-HP2E pour la préparation et la valorisation de ce séminaire

raire et dans la conception de modes de conduite des cultures minimisant leur impact environnemental.

Le travail sol a une action directe sur la structure du sol (par fragmentation et tassement), la localisation de la matière organique et des éléments minéraux, ainsi que celle de graines d'adventices et de certains pathogènes. De nombreux processus biophysiques et états du milieu en dépendent : lit de semences (et donc qualité de l'implantation des cultures), enracinement et fonctionnement racinaire, avec des conséquences significatives sur la production végétale, le stockage et l'infiltration ou le ruissellement de l'eau, cycles biogéochimiques du carbone et des éléments minéraux (azote, phosphore, soufre...) et de l'ensemble des xénobiotiques, composition et activité des communautés vivantes ...

Parmi les différentes techniques de travail du sol, le labour, par l'importance du volume de terre concerné et par l'inversion des horizons qu'il entraîne, est la technique dont l'impact sur toutes ces composantes est probablement le plus important. Il importe, dans le cadre de la mise au point d'une agriculture multi-performante, de comprendre ces effets afin d'en tirer le meilleur parti pour optimiser l'emploi des intrants et maîtriser les effets sur l'environnement.

Par ailleurs, le travail du sol se trouve au cœur de la tension entre deux visions du statut du sol : pour les uns, facteur de production qu'il est nécessaire de gérer dans la durée ; pour les autres, patrimoine qu'il est indispensable de sauvegarder en l'état. La première consiste à aborder le travail du sol comme un moyen d'améliorer la performance technique de l'exploitation agricole confrontée à des enjeux de productivité du travail, de gestion de grandes surfaces... La seconde est plutôt motivée par la recherche de pratiques alternatives au labour considéré comme impactant négativement et systématiquement un ensemble de fonctions attendues du sol. Ces deux visions recoupent des conceptions de la fonction de production agricole assez distinctes et doivent nous conduire à mieux expliciter les objectifs poursuivis par le travail du sol, les états du milieu à obtenir par rapport aux processus et fonctions écologiques sur lesquels on souhaite agir. Sans cet effort de clarification nous continuerons à étudier des systèmes dits « sans labour » et devrons gérer ce choix comme une contrainte initiale, ce qui appauvrirait considérablement la réflexion et la portée des travaux. Ces objectifs affectés au travail du sol sont d'ailleurs variables selon la nature des enjeux locaux : érosion, transferts de polluants, stockage d'eau, adventices, ravageurs...

Il nous faut donc dépasser la dichotomie « labour *versus* non-labour », ceci est d'autant plus nécessaire que la diversité des pratiques de travail du sol à l'œuvre sur le terrain va croissante : une proposition de typologie (chapitre 1) basée sur le mode d'action des outils, leur profondeur d'action, la proportion de surface affectée et la durée de différenciation, rend ainsi compte de cette diversité et permettra de mieux prédire les effets de modalités intermédiaires.

Cette diversité met aussi en lumière que le travail du sol n'est qu'un élément du système de culture : l'insertion de couverts végétaux plurifonctionnels dans les rotations, les pratiques de désherbage mécanique, la valorisation des produits résiduels organiques accroissent encore cette complexité des interactions attendues et renforcent la nécessité de traiter les effets au travers d'une analyse globale de

ce système. Cela interroge à la fois les pratiques et les thématiques de recherche. La grille de lecture proposée par la définition des services écosystémiques (d'approvisionnement, de régulation, de support) pourrait guider dorénavant notre façon de renseigner les effets des systèmes de culture et plus particulièrement ceux du travail du sol (conclusion, cet ouvrage). Plusieurs questions découlent alors de ce concept : quels sont les services attendus de mon agroécosystème ? Quel compromis faut-il rechercher ? Comment gérer l'agroécosystème pour qu'il fournisse les services attendus ? Quelle place du travail du sol dans cette gestion ?

Même s'il est ainsi possible de questionner le sol sur ces bases conceptuelles rénovées, les connaissances acquises en France sur les effets du travail du sol sont nombreuses, multidisciplinaires, appuyées sur l'instrumentation de sites de longue durée comme les essais Arvalis de Boigneville, les essais « système » conduits par l'Inra (par exemple essai « adventives » de Dijon) ou bien les systèmes d'observation et de recherche pour la recherche en environnement (SOERE) qui constituent de véritables plate-formes collaboratives entre la recherche et le développement. Il était donc nécessaire de faire un point aussi complet que possible sur ces acquis de façon à dresser un état partagé des connaissances sur les effets non pas « du » travail du sol mais « des » diverses modalités de travail du sol. Cet ouvrage aspire à dresser cet état des lieux des connaissances et propose de traiter à la fois des processus impactés par le travail du sol, de proposer un éclairage sur des techniques récentes et innovantes, et d'aborder les effets de la diversité de sa mise en œuvre sur le fonctionnement des systèmes de culture et d'exploitation.

Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en œuvre et effets sur le rendement des cultures

J. ROGER-ESTRADE, J. LABREUCHE, H. BOIZARD

Le travail du sol, considéré comme l'ensemble des opérations mécaniques fragmentant le sol, tient une place à part dans les systèmes de culture. Comparé aux autres techniques agricoles, son impact sur les caractéristiques des sols cultivés est en effet bien plus global (figure 1.1).

En premier lieu, cet impact passe par la modification de la structure du sol : les actions mécaniques exercées par les outils (fragmentation et déplacement) et les tracteurs (tassement) modifient rapidement, et parfois très fortement, la structure. Or, celle-ci affecte un grand nombre de processus qui se déroulent dans le sol (circulation de l'eau et de l'air, intensité et nature des réactions biogéochimiques, conditions dans lesquelles s'activent la faune et la flore du sol, croissance et développement des adventices...). Ainsi les caractéristiques organiques, chimiques, biologiques, hydriques des couches superficielles sont affectées indirectement, via la structure, par le travail du sol et le roulage des engins.

À cet impact indirect s'ajoutent les impacts directs sur ces mêmes composantes de l'état des sols cultivés. En effet, le type de travail du sol (avec ou sans retournement, profond ou superficiel, avec des outils animés ou traînés,...) détermine la répartition verticale du stock de graines d'adventices, celle des éléments minéraux peu mobiles dans le sol, celle des résidus de culture ou des amendements. De même, le passage des outils affecte directement les populations ou la composition spécifique de la plupart des communautés d'organismes vivant dans et sur le sol. De même, le type de travail du sol et tout particulièrement la présence ou non du labour, détermine la présence (ou non) d'un mulch, c'est-à-dire d'une couverture de la surface du sol, constituée des résidus de culture ou d'une plante vivante. Ce mulch est d'une importance capitale pour la protection contre l'érosion, la lutte contre les adventices, les flux d'eau et de chaleur, la faune du sol.

Dans les systèmes de culture où l'on vise un rendement aussi proche que possible du maximum permis par la photosynthèse, le développement de l'usage des intrants de synthèse a, peu à peu, cantonné le rôle du travail du sol à un moyen de corriger les états structuraux jugés défavorables, pour améliorer l'efficacité d'utilisation des intrants (eau, éléments minéraux) et les conditions de germination et de levée des cultures.

Dans les systèmes de culture en agriculture biologique ou dans les zones où l'érosion représente un réel problème, en revanche, le rôle du travail du sol est resté crucial : c'est un levier majeur pour faire face aux problèmes posés par le contrôle des adventices ou la maîtrise du ruissellement.

Quel que soit le type d'agriculture, le travail du sol pèse sur les performances économiques des exploitations : les opérations, surtout celles de travail profond, sont coûteuses en énergie fossile et en charges de mécanisation. Par ailleurs, le travail du sol impacte considérablement, à certaines périodes, l'organisation du travail. Ce qui peut amener à supprimer le travail profond pour une meilleure répartition des pointes de travail au cours de l'année.

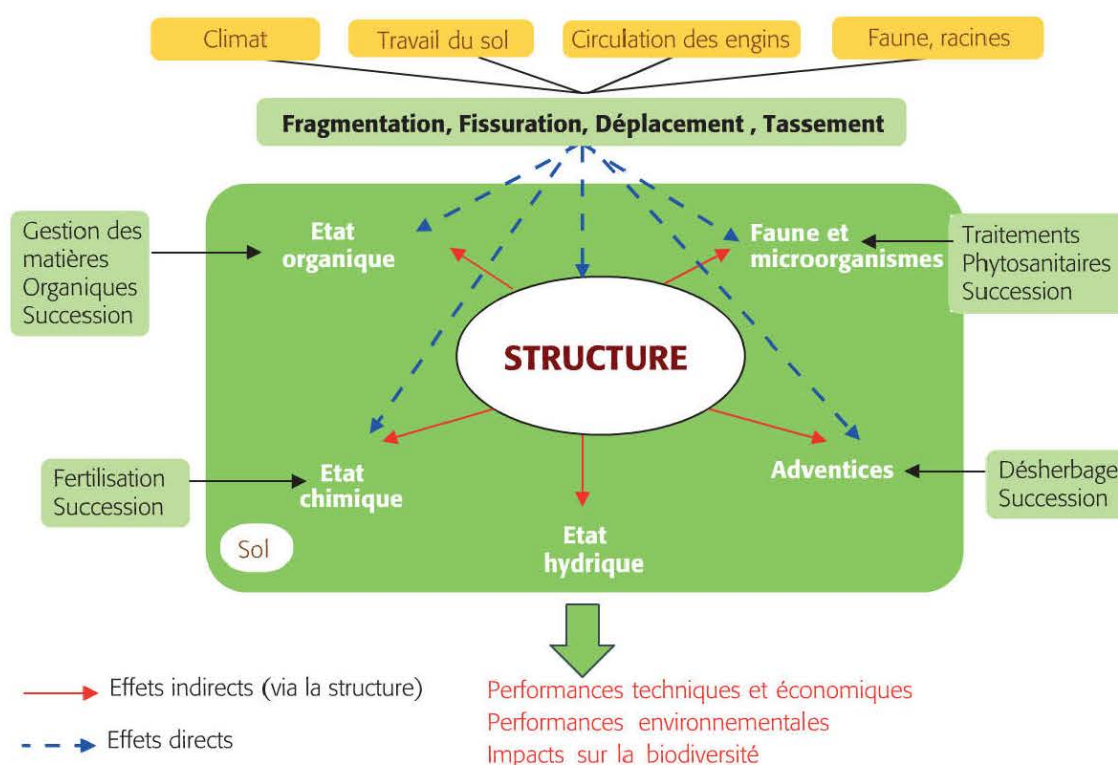


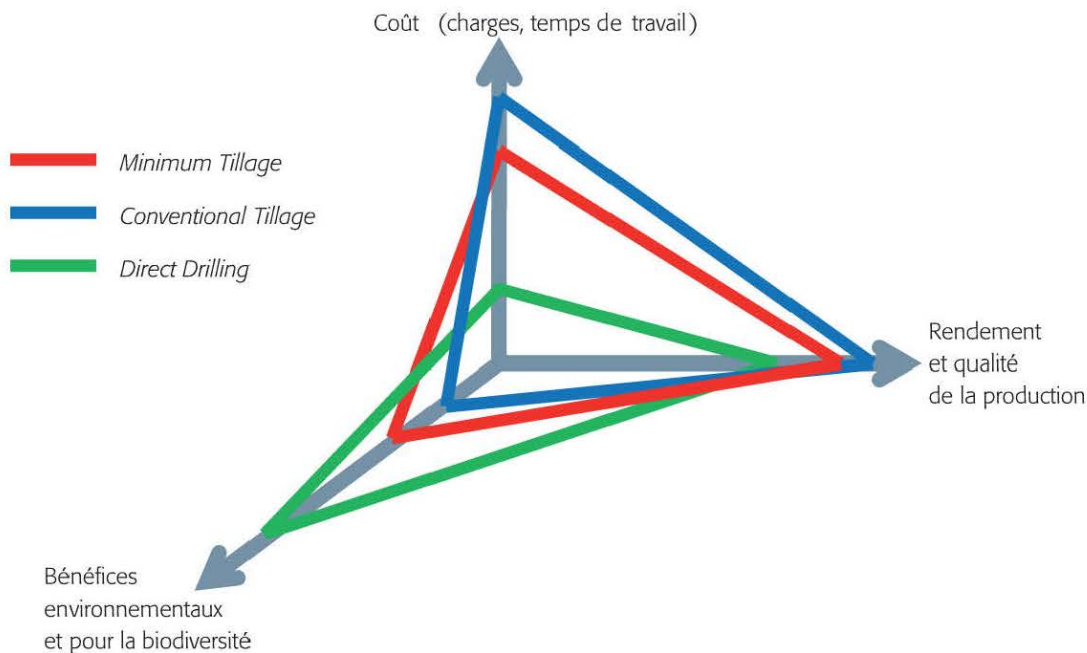
Figure 1.1 : Effets directs et indirects des actions mécaniques liées au travail du sol sur les états des sols cultivés (d'après Richard et Roger-Estrade, 1999)

Ainsi, les choix en matière de préparation des sols sont, dans une exploitation agricole, déterminants sur les plans économique, agronomique et environnemental. Il n'est donc pas étonnant que le travail du sol se trouve au cœur des débats concernant la manière de faire évoluer les systèmes de culture pour faire face au nouveau contexte auquel l'agriculture est confrontée (baisse des charges, réduction des impacts environnementaux, diminution de l'utilisation des carburants fossiles, atténuation et adaptation au changement climatique...).

Il est possible de comparer ces choix à partir d'un triptyque comprenant trois catégories de critères : ceux déterminant les performances en matière de rendement et de qualité des produits ; ceux permettant d'apprécier l'impact sur l'environnement et la biodiversité et ceux enfin qui déterminent les performances économiques

(Morris *et al.* 2010). Ces auteurs proposent de représenter la position d'un type donné de préparation de sol sur un schéma à trois axes, comme indiqué sur la figure 1.2. Ils présentent trois exemples : un itinéraire conventionnel avec labour (*conventional tillage*), le plus performant en matière de rendement, mais présentant un coût économique élevé et des performances environnementales moins favorables ; à l'autre extrême, le semis direct (*direct drilling*) avec des rendements un peu plus faibles en moyenne, mais aussi avec des coûts beaucoup plus bas et des bénéfices pour l'environnement et la biodiversité plus élevés que l'itinéraire avec labour ; les systèmes avec travail du sol simplifié (*minimum tillage*) se situeraient entre ces deux cas sur chacun de ces trois axes.

Si ces trois axes constituent un moyen commode de comparaison, on ne peut bien évidemment considérer cet exemple (pourtant très souvent cité dans les débats sur le travail du sol) comme entièrement généralisable : certains itinéraires de semis direct sont, sur le plan environnemental, moins bien placés que des itinéraires conventionnels ; certains itinéraires conduits en techniques culturales simplifiées peuvent, sur le plan des coûts, dépasser des itinéraires conventionnels, etc.



Workshop «travail du sol» - 4 & 5 décembre 2012 Boigneville

Figure 1.2 : Performances des différents systèmes de travail du sol (d'après Morris et al. 2010).

La question de l'évaluation des performances se heurte ainsi à trois difficultés, qui sont souvent insuffisamment prises en compte dans les débats sur le travail du sol. Tout d'abord, l'extrême diversité des types d'outils et des manières de les combiner pour préparer une parcelle, quel que soit le système de travail du sol choisi. Dans la première partie de ce chapitre, nous tenterons une présentation structurée de cette diversité, mettant l'accent sur la multiplicité des objectifs et des modes d'action des outils.

Une deuxième difficulté tient au fait que les transformations de la structure du sol sont aussi dues à d'autres agents que le travail du sol ou le roulage, naturels

ceux-là : les racines, la faune, le climat agissent sur la structure. Leur action est très variable en fonction des conditions de milieu (type de sol, climat, biologie du sol) et elle devra également entrer en ligne de compte lorsqu'il s'agira d'évaluer les performances de tel ou tel itinéraire de travail du sol ou les risques pris avec une option donnée. Le rôle de ces agents dans l'évolution (plus précisément la régénération) de la structure sera présenté plus loin dans cet ouvrage.

Enfin, connaître la technique seule ne suffit pas pour prévoir l'effet sur le milieu cultivé. En interaction avec le type de sol, les conditions d'emploi des outils (réglage, vitesse, profondeur d'action) et les dates d'intervention sont au moins aussi importantes à considérer que la nature même des pièces travaillantes.

Les raisons exposées ci-dessus expliquent pour une large part à la fois la variabilité des données sur le travail du sol, qui sont d'ailleurs souvent contradictoires et, dans une certaine mesure, le peu de différences observées dans les études statistiques portant sur le rendement des cultures entre les différents systèmes de travail du sol. Une synthèse des résultats de ces études sera présentée dans la deuxième partie de ce chapitre. Par ailleurs, dans chacun des autres chapitres de ce livre, les auteur(e)s insistent sur la dépendance des résultats aux conditions de sol, au climat, au réglage des outils, au type d'activité biologique.

Diversité des modes de travail du sol

Trois critères peuvent être utilisés pour classer la diversité des types d'outil de travail du sol (tableau 1.1) :

1. Le mode d'effet que l'outil a sur le sol et sur les résidus de culture. Si la fragmentation est systématique, elle ne s'accompagne d'un retournement des horizons que dans le cas du labour avec une charrue. Ceci étant, on peut mélanger des résidus et du sol sans retourner ce dernier : c'est le cas avec toute la gamme des outils à dents ou à disques, animés ou non, employés dans le cadre des techniques culturales sans labour. Enfin, certains outils ne font que fragmenter le sol, en préservant les résidus (le mulch) à la surface du sol.
2. Le deuxième critère, déterminant en particulier lorsque l'on considère la dépense énergétique liée au travail du sol, est la profondeur de travail. Classiquement, en situation agricole, celle-ci varie de 0 à 30 cm environ, mais peut atteindre 80 cm de profondeur dans des cas exceptionnels. Un même outil peut être employé à des profondeurs très variables. Par exemple, les profondeurs de labour ont, au cours du temps, fortement varié. Un mouvement général de remontée des labours a ainsi pu être observé dans les années 1960-1970, en France, particulièrement dans les régions de grande culture où l'on s'inquiétait de l'effet de dilution de la matière organique par le labour. On observe, depuis une petite dizaine d'années, des essais de labours très superficiels (10-15 cm), pratiqués avec des charrues à versoir.
3. Enfin, il faut ajouter un troisième critère qui est la proportion de la surface de la parcelle effectivement travaillée, tout particulièrement depuis le développement d'équipements de type « strip till » ou de semoirs spécialisés pour le semis direct, pour lesquels le travail du sol est concentré à proximité de la ligne de semis sur une

Tableau 1.1 : Classification des opérations de travail du sol.

		Fragmentation + Retournement + Enfouissement	Mélange + Enfouissement		Pas de mélange et un minimum d'enfouissement	
		Fragmentation sans retournement				
Profondeur	Pas de travail	semis : 3 cm, reste: 0 cm				Semis direct (sous couvert)
	Superficiel	3 -15 cm	Labour très superficiel (≤15cm) Déchaumeur à versoirs	Travail superficiel Dents, disques, chisel, herbes, houes, cultivateur, canadien vibroculteurs	Travail superficiel en bandes Strip tillers Rotasemis	
	Profond	15 - 40 cm	Labour +/- profond Charrue à versoirs (+rasette)	Pseudo-labour machines à bêcher, charrue à disques, cultivateurs lourds (chisel), pulvérisateurs lourds (disques), charrue Express		Décompactage lames, dents
	Très profond	40 - 80 cm	Labour très profond, défoncement Charrue « robuste »			Sous-solage dents (+ obus)
		100%	100%	Bandes 30%	100%	Ligne de semis 5%
Zone travaillée (%)						

Fragmentation sans retournement = TCS

bande plus ou moins large. Ces techniques introduisant en quelque sorte l'agriculture de précision dans le domaine du travail du sol.

Le tableau 1.1 a été bâti en croisant ces trois critères et en faisant figurer dans les cases quelques-uns des outils les plus utilisés en grande culture.

Cette diversité des options techniques pour travailler le sol, gérer les résidus, en entraîne une autre, celle des systèmes de travail du sol, que l'on peut définir comme la combinaison logique des opérations mécaniques sur le sol, ayant pour objectif la préparation de ce dernier pour y recevoir les cultures de la succession. Cette définition met l'accent d'une part, sur la logique de l'enchaînement des actions menées pour implanter une culture donnée, souvent après une succession d'opérations visant chacune un ou plusieurs objectifs et, d'autre part, sur l'idée d'un enchaînement de ces opérations, qui peut varier suivant l'ordre de succession des cultures. Il y a deux manières de classer les systèmes de travail du sol :

1. En utilisant comme critère l'opération de travail la plus profonde. Sur le plan de l'économie, ce type de classification est important dans la perspective d'une évaluation du coût du travail du sol (en carburant, en main-d'œuvre, en carbone fossile), même si celui-ci dépend aussi du nombre d'opérations. Sur le plan de l'agronomie, cette classification est pertinente pour raisonner la dilution des éléments minéraux et du carbone, la localisation et le mélange de la matière organique, la fragmentation des couches profondes.

On peut ainsi distinguer cinq grands types d'itinéraires de travail du sol, ordonnés selon l'importance de la place qu'occupe l'opération la plus profonde, qui est justement celle qui consomme le plus d'énergie (tableau 1.2).

Cette classification est imparfaite, dans la mesure où le classement sur un gradient de dépense énergétique peut être discuté : en effet, l'énergie dépensée dépend aussi

Tableau 1.2 : Systèmes de travail du sol, classés selon l'opération la plus profonde.

Système de travail du sol		Profondeur de travail (cm)
A	Travail du sol profond avec labour	15-40
	Travail du sol profond, sans retournement	
B	B1 :pseudo-Labour (avec mélange terre/résidus)	15-70
	B2 : décompactage et sous-solage (sans mélange terre/résidus)	
C	Travail du sol superficiel sur toute la surface	5-15
D	Travail du sol superficiel en bandes (strip-till)	5-20
E	Semis direct (travail uniquement sur la ligne de semis)	0

Le labour désigne ici uniquement le travail réalisé avec une charrue à versoirs.

Le pseudo-labour est défini dans le tableau 1.1

Cette classification ne prend pas en compte la fréquence des opérations : ainsi le labour peut être pratiqué tous les ans ou plus occasionnellement tous les 3-4 ans (*rotational tillage*).

du nombre d'opérations effectuées au cours de l'itinéraire de travail du sol et pas seulement de la nature de l'opération la plus profonde. Par ailleurs, il existe des systèmes intermédiaires entre les catégories A à E. Par exemple B1/A lorsqu'un sous-solage est pratiqué occasionnellement dans un système avec labour régulier ou intermittent.

2. En classant les systèmes par le nombre d'opérations de travail du sol effectuées en moyenne tous les ans, évalué sur une rotation type. Ce classement est pertinent pour comparer les systèmes par rapport à l'organisation du travail, au risque de tassement, au bilan énergétique. En étant prudent toutefois : sur le dernier point par exemple, les opérations n'ayant pas toutes le même poids en terme d'énergie dépensée, ne prendre en compte que leur nombre biaise le résultat. Il faut ainsi être prudent également sur le terme « intensif » qui est souvent employé (en anglais, on emploie l'expression *intensive tillage*). Il faut préciser ce à quoi le qualificatif se réfère : ce peut être au volume de terre fragmenté mais aussi au nombre de passages (pas forcément très profonds) voire à la nature des outils employés (outils animés ou simplement traînés).

La notion d'agriculture de conservation est de plus en plus utilisée à travers le monde y compris en France ; elle est souvent associée à celle de travail du sol de conservation (*conservation tillage* en anglais). Elle comprend trois éléments (Derpsch *et al.*, 2010) :

- le maintien d'une couverture suffisante du sol (plus de 30 % de la surface couverte et au minimum une biomasse sèche de résidus de 1,1 t/ha) durant toute l'année. Cette couverture est constituée soit des résidus morts de la culture précédente, soit de plantes vivantes ;
- une perturbation minimale du sol, sans retournement. Plusieurs types de travail du sol peuvent correspondre à cette exigence, le semis direct bien évidemment, y compris lorsqu'il est pratiqué sur couverture végétale, que celle-ci soit morte ou vivante. Mais le strip-till (travail du sol en bandes) s'inscrit aussi dans ce cadre, dans la mesure où la zone perturbée (sur la ligne de semis) représente une proportion de sol travaillé superficiellement inférieure à 25 % de la surface ;

- une diversification des cultures, avec des rotations suffisamment variées (pour des raisons sanitaires) incluant des légumineuses (pour la fertilité) et éventuellement avec des cultures associées. Cette dernière instruction reste toutefois vague, le degré de diversification n'étant pas précisé.

Ce taux de couverture (par les résidus ou la plante de service) est déterminant, mais le non-retournement du sol ne suffit pas toujours à le garantir : lorsque la culture précédente laisse très peu de résidus (soja dont le rendement était faible par exemple) et/ou lorsque ceux-ci se sont décomposés très rapidement, le taux de couverture peut être très faible.

Importance du non-labour en France

La proportion de parcelles implantées sans labour en France a été évaluée en 2001, 2006 et 2011 par l'enquête sur les pratiques agricoles réalisées par le Ministère en charge de l'agriculture (Agreste, 2008, 2011) et par Labreuche *et al.* (2007) pour la campagne 2005/2006. La figure 1.3 et le tableau 1.3 illustrent les principaux résultats de ces enquêtes.

Le développement des surfaces cultivées avec des techniques culturales sans labour (figure 1.3) a été lent sur blé et colza, mais continu entre 1994 et 2001 et plus rapide, notamment sur blé, à partir de 2002. Les surfaces n'ont plus évolué entre les enquêtes de 2006 et 2011, les cultures d'automne étant implantées pour ces deux années sur environ la moitié des surfaces (figure 1.4). Concernant les cultures de printemps, le même travail de recensement des pratiques montre que le labour est beaucoup plus présent sur ces cultures (tableau 1.3). En 2006 et 2011, on pouvait estimer que respectivement 34 et 35 % des surfaces de grande culture n'étaient

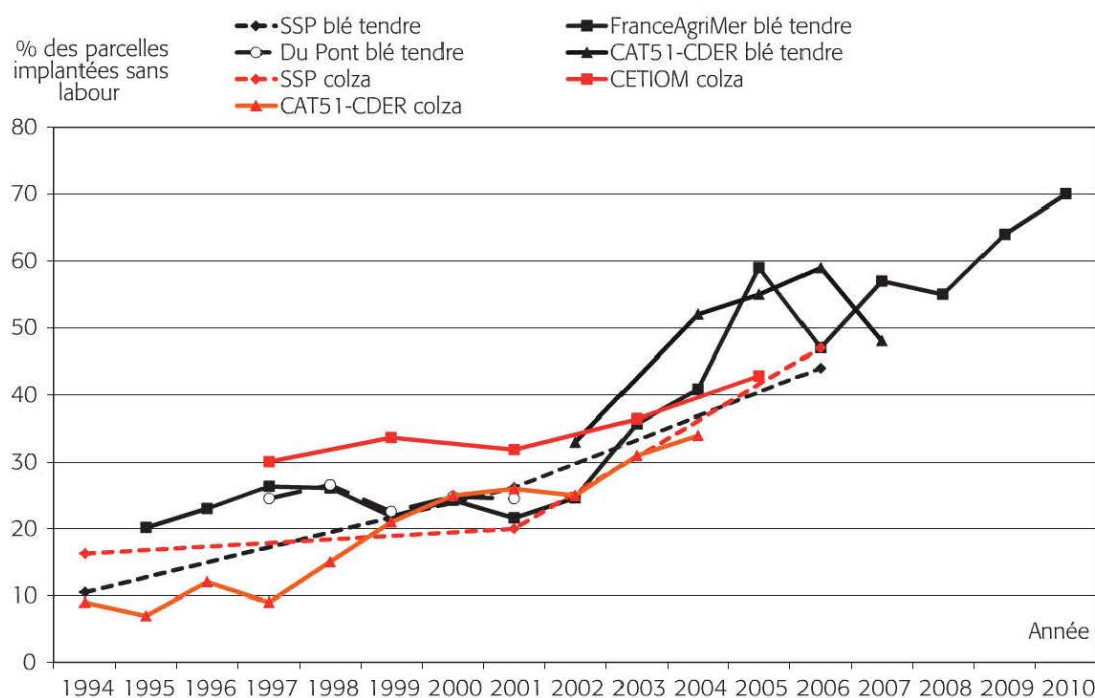


Figure 1.3 : Dynamique de développement des techniques culturales sans labour en France sur blé tendre et colza, au travers de différentes enquêtes (Labreuche *et al.*, 2007).

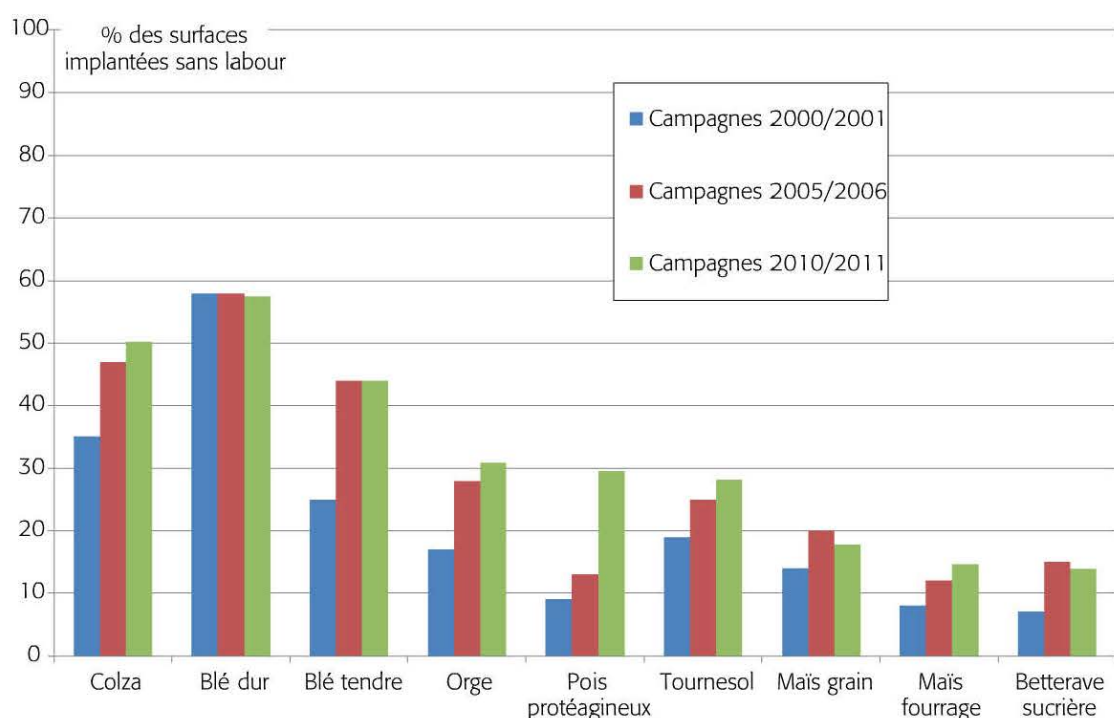


Figure 1.4 : Pourcentage des surfaces implantées sans labour par culture en France (enquête pratiques culturales MAAF-SSP, campagnes 2000-2001, 2005-2006 et 2010-2011).

plus systématiquement labourées tous les ans ; les cultures d'automne étant nettement plus concernées que celles de printemps. L'enquête de 2006 (Agreste, 2008) a permis de connaître les pratiques des cinq années précédant la culture de 2006 (nature des précédents culturaux et pratique ou non de labours). Il en ressort que la fréquence de non-labour pendant au moins six campagnes successives est faible, sans être nulle : de 4 à 17 % selon les cultures (figure 1.5). Le labour continu

Tableau 1.3 : Répartition des modes d'implantation de la culture (labour, travail du sol sans labour ou semis direct) pour les principales grandes cultures. Source : Agreste - Enquête Pratiques culturales 2011

	Travail du sol sans labour %	Labour %	Semis direct %
01 Blé tendre	40	56	4
02 Blé dur	53	42	4
03 Orge	30	69	1
04 Triticale	23	74	2
05 Colza	50	49	
06 Tournesol	27	72	1
07 Pois protéagineux	27	70	2
08 Maïs fourrage	15	85	
09 Maïs grain	18	82	
10 Betterave sucrière	14	86	
11 Pomme de terre	1	86	

représente quant à lui 23 à 65 % des parcelles selon la culture pratiquée en 2006. L'alternance entre labour et non-labour est la pratique dominante, mais le labour systématique reste encore assez répandu et le non-labour continu est au contraire limité en France.

Les techniques culturales sans labour, même si on peut les rencontrer dans toutes les situations, sont plus fréquentes dans quelques cas : cultures d'automne, sols argilo-calcaires, région du grand Sud-Ouest... Ces constats sont cohérents avec les motivations principales citées par les agriculteurs pour supprimer le labour : gagner du temps, faciliter l'organisation du travail, réduire les charges de mécanisation, améliorer les conditions d'implantation des cultures en sols argilo-calcaires ou argileux. En effet, un travail profond entraîne la fabrication de lits de semences grossiers, car le sol se dessèche après labour, devenant très difficile à fragmenter, notamment après un été et/ou un automne secs. La taille moyenne des exploitations pratiquant les techniques culturales sans labour est un peu supérieure à celles qui pratiquent le labour (+15 à 20 %). Les situations où le labour est majoritaire correspondent aux situations avec des sols peu argileux et incluant des cultures de printemps. Les régions bordant la Manche, de la Bretagne au Nord - Pas-de-Calais, sont celles qui pratiquent encore le plus le labour, y compris avant blé.

Des enquêtes d'opinion (comme celle réalisée par ADQuation en 2012) montrent une volonté des exploitants agricoles de réduire à l'avenir l'usage de la charrue au profit de techniques comme le strip till, afin de répondre à des préoccupations d'ordre économique, organisationnel ou agronomique. Cependant, les difficultés croissantes de contrôle des adventices, et en particulier de certaines populations de graminées résistantes aux herbicides, amènent de nombreux producteurs à maintenir le labour au moins occasionnellement dans leurs itinéraires, faute d'avoir su trouver d'autres leviers efficaces. C'est ce qui semble expliquer la stabilisation de la part des surfaces non labourées entre 2006 et 2011.

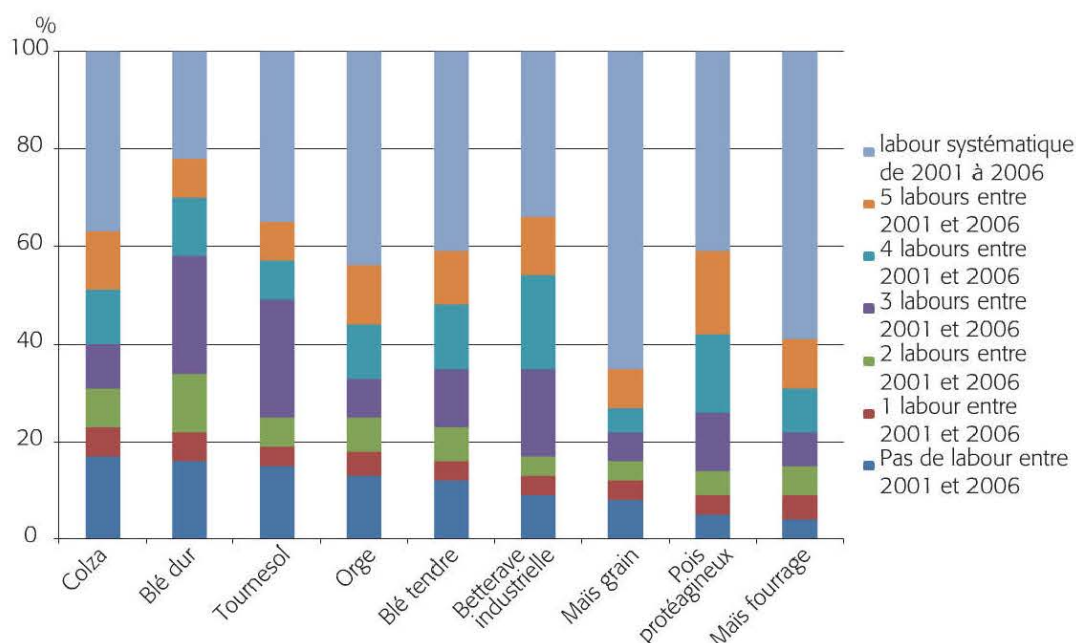


Figure 1.5 : Nombre de labours de 2000-2001 à 2005-2006 selon la culture récoltée en 2006.

Source : Agreste

D'autres enquêtes apportent quelques informations supplémentaires sur le travail du sol réalisé en l'absence de labour. Le travail avant blé est plutôt superficiel puisque 75 à 90 % des parcelles ne font l'objet d'aucun travail en profondeur. Une enquête Cetiom 2005 sur colza montre par contre que 87 % des colzas implantés sans labour ont fait l'objet d'un travail à plus de 8 cm de profondeur. 70 % des betteraves implantées sans labour ont subi un décompactage (enquête ITB, 2005), contre 61 % sur tournesol (enquête Cetiom, 2004). L'enquête pluriannuelle Du Pont 2001 nous apprend par ailleurs que le nombre de déchaumages augmente avec la suppression du labour (+ 0,5 passage/an). Ces quelques informations montrent bien que si les techniques sans labour se développent, il faut encore largement relativiser la « révolution » qu'elles représentent au niveau agronomique. En effet, les parcelles avec suppression continue du labour sont encore peu nombreuses. Par ailleurs, la suppression du labour est encore loin de signifier la suppression totale du travail du sol dans la majorité des parcelles. Par exemple, le semis direct ne représentait que 2 % des surfaces en 2011 alors que 35 % des surfaces n'étaient plus labourées. Ces éléments doivent être gardés en mémoire car il existe un décalage flagrant avec les pratiques pouvant être observées sur quelques essais de longue durée ou chez quelques exploitants avant-gardistes, pratiquant par exemple le semis direct continu.

Effets du système de travail du sol sur les rendements

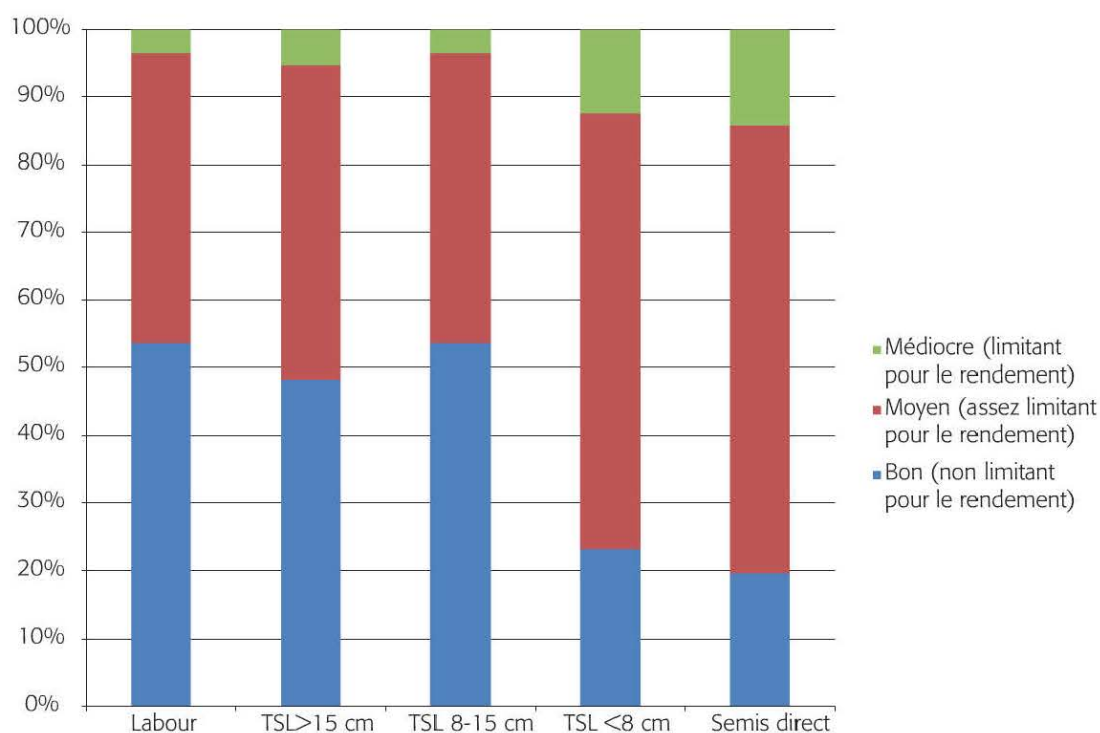
Élément clef de la performance économique des systèmes de culture, le rendement des espèces cultivées est affecté de manière très variable par le système de travail du sol. Avant d'aborder de façon détaillée les résultats de dispositifs expérimentaux français (chapitre 2), nous présentons quelques synthèses globales rassemblant des résultats internationaux conduits dans des contextes très divers.

De manière très générale, en fait quasi systématiquement, les études, qu'elles soient expérimentales ou menées par enquêtes sur les effets des systèmes de travail du sol sur le rendement des cultures, sont présentées en prenant les systèmes avec labour systématique comme témoin ou référence. Ainsi, Van den Putte *et al.* (2010) ont étudié les résultats de 47 études menées sur 75 sites à travers l'Europe. Leur analyse montre que l'adoption du non-labour diminue, en tendance, les rendements. Toutefois cette diminution est plus forte pour les systèmes de non-travail du sol stricts, alors que les systèmes de travail du sol réduit sans retournement n'entraînent de réduction du rendement que pour certaines cultures seulement, en particulier le maïs et la betterave. Cette étude confirme plusieurs résultats antérieurs d'enquêtes comme celle menée en France par le SCEES (Agreste, 2008). Les résultats de cette enquête, même s'ils sont cohérents avec d'autres données en France et en Europe, sont cependant à considérer avec prudence, car il existe un fort risque de confusion d'effets. Avec l'effet du type de sol par exemple, le non-labour étant plus fréquent sur certains types de sol, comme cela est mentionné ci-dessus. La diminution de rendement par rapport au labour est, au moment de l'enquête, de l'ordre de 4,5 % globalement, tous systèmes de non-labour confondus. La betterave en particulier est très sensible aux conditions d'implantation, moins favorables en système de travail du sol réduit qu'en système conven-

tionnel avec labour régulier. Au-delà d'une profondeur de travail de 15 cm, et sauf pour le maïs, le rendement n'est pas inférieur en système de non-labour, et apparaît même parfois supérieur. L'analyse plus fine de ces résultats montre que, excepté pour le maïs, la perte de rendement est inversement proportionnelle à la profondeur de travail. Concernant le colza, une enquête conduite en 2006-2007 sur 387 parcelles, confirme cette relation (figure 1.6).

Cette étude ne permet pas de trancher clairement sur l'interaction entre système de travail du sol et déficit hydrique. Dans certains cas, en système de travail réduit et en conditions sèches, le système racinaire contraint par une structure du sol moins favorable présente une efficacité d'utilisation de l'eau plus faible qu'en système conventionnel ; dans d'autres cas au contraire, la présence d'une couverture de résidus diminue l'évaporation, ce qui permet une meilleure alimentation en eau des cultures (essentiellement des céréales à paille) en non-labour.

Toujours en Europe, Soane *et al.* (2012) ont recensé les données expérimentales issues de 13 publications comparant labour et semis direct (strict, en excluant les systèmes de travail du sol réduit) dans neuf pays européens (dont Boigneville pour la France). Pour la majorité de ces études, les rendements en semis direct et en labour sont très proches, les écarts de rendement n'excédant en général pas 5 %. Cependant, les rendements obtenus en situation non labourée tendent à approcher ceux obtenus en labour, voire à les dépasser lorsque la pluviométrie décroît, du Nord au Sud de l'Europe, contredisant certaines études mentionnées



Labour : 129 parcelles ; TSL > 15 cm sans labour : 44 parcelles ; TSL compris entre 8 et 15 cm : 160 parcelles ; TSL < 8 cm : 25 parcelles et semis direct : 29 parcelles.

TSL : techniques sans labour

Figure 1.6 : Pourcentage de parcelles pour lequel le mode de travail du sol a limité sévèrement moyennement ou pas du tout le rendement. Source : CETIOM, enquête 2007-2008 dans les régions Centre, Poitou-Charentes, Bourgogne, Lorraine. <http://www.cetiom.fr>.

par Van de Putte *et al.*, (2010). Ainsi en Europe du Nord, les rendements en semis direct ne dépassent quasiment jamais ceux obtenus en situation labourée et sont parfois très nettement inférieurs (jusqu'à 60 à 80 % de la valeur observée en situation labourée pour de l'orge de printemps, de l'avoine ou du blé en Finlande). Il faut souligner toutefois que ces résultats ont été obtenus pendant la période de transition après abandon du labour. En revanche, les essais menés en Espagne et au Portugal, montrent qu'en semis direct on peut obtenir de meilleurs rendements des céréales en semis direct plutôt qu'après un labour, jusqu'à deux fois plus (Fernandez-Ugalde *et al.*, 2009). Les mécanismes responsables de la réduction des rendements en semis direct varient bien évidemment avec les conditions locales. Dans les sols légers du Danemark, c'est le tassement qui apparaît comme la cause principale. En Suède et en Norvège la gestion des résidus est plus problématique que le tassement. Enfin en Finlande, le tassement, la gestion des résidus et le contrôle des adventices sont tous les trois invoqués à part égale.

Par ailleurs l'étude de Soane *et al.*, (2012) est plus complète que celle de Van de Putte *et al.* (2010), car elle envisage aussi l'ensemble des critères permettant une évaluation complète des deux systèmes. Sans entrer dans le détail des effets (qui seront développés dans le Chapitre 2), l'analyse fait ressortir l'intérêt du semis direct pour la maîtrise de l'érosion. Elle ne tranche pas sur le bilan en matière d'émission de gaz à effet de serre (hors économie résultant de la réduction de consommation de fuel) et ne met pas en évidence de gain en matière de séquestration du carbone lié à l'adoption du semis direct (système qui toutefois entraîne une modification de la répartition verticale du carbone dans le profil). Enfin, les auteurs alertent sur le risque d'une moins bonne maîtrise des adventices en semis direct.

Hors d'Europe, une méta-analyse a été réalisée par Alvarez et Steinbach (2009) sur un grand nombre de publications comparant les rendements en labour et semis direct dans des pampas humides d'Argentine. Cette étude montre que les rendements en semis direct sont diminués (toujours par rapport au système avec labour) en moyenne de 13 % en blé et de 6 % en maïs. En revanche, il n'y a pas d'effet sur le rendement du soja. Ces mêmes auteurs montrent également qu'en ne considérant que les données correspondant à des situations avec fertilisation azotée, on ne retrouve plus de différence entre semis direct et labour, quelle que soit la culture.

Ces résultats doivent cependant être considérés avec précaution. En effet, plusieurs éléments rendent difficile la comparaison entre les situations labourées et celles en semis direct ou techniques culturales simplifiées, au premier rang desquels le nombre d'années depuis l'abandon du labour au profit du semis direct (données européennes) ou depuis le défrichement (une partie des données sud-américaines). Cette question est très importante, dans la mesure où l'on peut penser que lors de la transition, il existe une période pendant laquelle on observe une évolution progressive de la structure et de la portance du sol (liée à l'accumulation progressive de matière organique en surface, à la mise en place d'une porosité d'origine biologique), mais aussi à l'acquisition progressive de la maîtrise technique du semis direct. La durée de cette période de transition fait débat. Dans les études analysées par Soane *et al.* (2012), les rendements diminuent, souvent

de manière appréciable, l'année suivant la conversion au semis direct. Mais après une période dont la durée est de l'ordre de trois ans, les rendements augmentent à nouveau (Christian et Ball, 1994). Cependant, on peut penser qu'à l'inverse, dans les années qui suivent l'abandon du labour, certains problèmes difficiles à résoudre s'amplifient (développement des adventices) et ont alors un effet négatif sur les rendements qui augmente progressivement. Enfin, ces données ne renseignent pas sur les variabilités interannuelles des rendements en fonction du type de travail du sol et donc sur la résilience ou la stabilité des systèmes de culture.

Conclusion

Les études présentées ci-dessus font ressortir que le non-labour peut être une solution viable pour l'agriculture, lorsque l'on se place du seul point de vue de la productivité agricole. Toutefois, Van de Putte *et al.* (2010) incitent à la prudence quant aux attentes à l'égard de l'agriculture de conservation : leurs données montrent que ce type de pratique, s'il peut remplacer la conduite conventionnelle avec travail profond régulier laissant le sol nu une partie de l'année, ne permet pas d'espérer, même avec le temps, une augmentation significative du rendement des cultures.

Mais la question de l'effet sur les rendements doit être replacée dans un débat plus large instruisant la question du rôle du travail du sol pour permettre à l'agriculture de faire face aux changements globaux et aux enjeux auxquels elle est confrontée. Dans ce débat, il faut prendre en compte l'ensemble des effets du travail du sol, y compris sur le plan environnemental. Ces effets seront abordés en détail dans les différents chapitres de cet ouvrage.

Mais ce débat est surtout nécessaire pour ne pas s'enfermer dans des positions dogmatiques prônant le tout labour ou, au contraire, l'abandon systématique et définitif de cette technique, considérant que ce renoncement est l'objectif à atteindre pour l'agriculture de demain, car il est le seul moyen de satisfaire tous les objectifs de durabilité (productivité, bilan énergétique, préservation de la biodiversité, intensification des régulations biologiques, amélioration de la qualité des sols...).

L'observation des évolutions actuelles des systèmes de culture en région de grande culture montre que le labour, même s'il n'est plus pratiqué de manière aussi systématique qu'avant, reste une pratique de travail du sol très fréquente, particulièrement dans le Nord de la France en raison de risques élevés de tassement, particulièrement lors des récoltes. Deux éléments caractérisent ces évolutions.

1. Une forte diversification des itinéraires de préparation du sol, avec tous les intermédiaires entre le semis direct et le travail du sol conventionnel (un labour annuel suivi d'une ou plusieurs façons superficielles). Certaines de ces préparations de sol, loin de représenter une simplification par rapport au système conventionnel, sont parfois plus complexes que ce dernier (impliquant par exemple des stratégies complexes de contrôle mécanique des adventices avant et pendant la culture). Cette diversité des modes de préparation entraîne une diversité des volumes de sol affectés (profondeurs de quelques centimètres à quelques décimètres). Elle a

des conséquences variables sur le devenir des résidus de culture (plus ou moins enfouis), sur la répartition du carbone au sein du profil de sol, sur la dynamique des adventices, sur les conditions de fonctionnement des racines, sur la qualité de préparation des lits de semences...

2. La pratique, très fréquente en région de grande culture (tout particulièrement lorsque des cultures d'été sont présentes dans la rotation), de labours « intermittents », effectués de manière plus ou moins régulière pour résoudre des situations devenues problématiques après quelques années de renoncement au labour (augmentation de la pression des adventices ou des risques de maladies, dégradation de la structure) ou pour faire face à des conditions climatiques exceptionnelles (périodes prolongées d'excès d'eau avant les semis).

Ces deux tendances entraînent l'apparition de conditions nouvelles, et complexes à appréhender pour l'évolution de l'état des sols cultivés. Cet état de fait est essentiel à considérer dans une perspective d'évaluation des services écosystémiques rendus par ces derniers.

Ainsi, des opérations de recherche qui, dans des essais comparant labour et non-labour (depuis une période de temps plus ou moins longue), étudient différents processus à la base de ces services (émission de GES, structure, stock de graines d'adventices...) ne répondent pas complètement aux attentes de la profession (qui attend des règles de décision plus précises que supprimer ou non le travail profond), ou aux besoins d'évaluation de l'impact du travail du sol sur l'environnement, les sols, la biodiversité.

Références bibliographiques

Agreste, 2008. Dans le sillon du non-labour. *Ministère de l'agriculture et de la pêche*.

Alvarez R., Steinbach H.S., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*, 104, 1–15.

Christian D.G., Ball B.C., 1994. Reduced cultivation and direct drilling for cereals in Great Britain. In: M. Carter (ed) « Conservation Tillage in *Temperate Agroecosystems* ». Raton, Florida, USA: Lewis Publishers. Pp 117–140.

Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Hongwen L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 3-1, 1–26. Open Access at <http://www.ijabe.org>

Fernandez-Ugalde O., Virto I., Imaz M.J., Enrique A., Bescansa P., 2009. Soil water retention characteristics and the effect on barley production under no-tillage in semi-arid conditions of the Ebro Valley (Spain). In: Kassam et al. (Eds), *Proc. 18th ISTRO Conf. Izmir, Turkey, 2009*.

Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S., Schubetzer C., Bastide G., Feix I., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour en France. *ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV*. <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=69872338DEBF31F72728710AAA008EC91224246166054.pdf>

Morris, N. L., Miller P. C. H., Orson J.H., Froud-Williams R. J., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment-A review. *Soil & Tillage Research*, 108, 1–15.

Richard, G., Roger-Estrade J. and Guérif J., 1999. Chantier « Travail du sol » du Département Environnement et Agronomie (État des lieux et perspectives de recherches). *Inra, Paris*, 8 pp.

Soane B.D., Ball B.B., Arvidsson J., Baschd G., Moreno F., Roger-Estrade J., 2012. No-till in Northern and Southern Europe: opportunities and problems for crop production and the environment. *Soil & Tillage Research*, 118, 66-87.

Van den Putte A., Govers G., Diels J., Gillijns K., Demuzere M., 2010. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *Europ. J. Agronomy*, 33, 231–241. doi:10.1016/j.eja.2010.05.008.

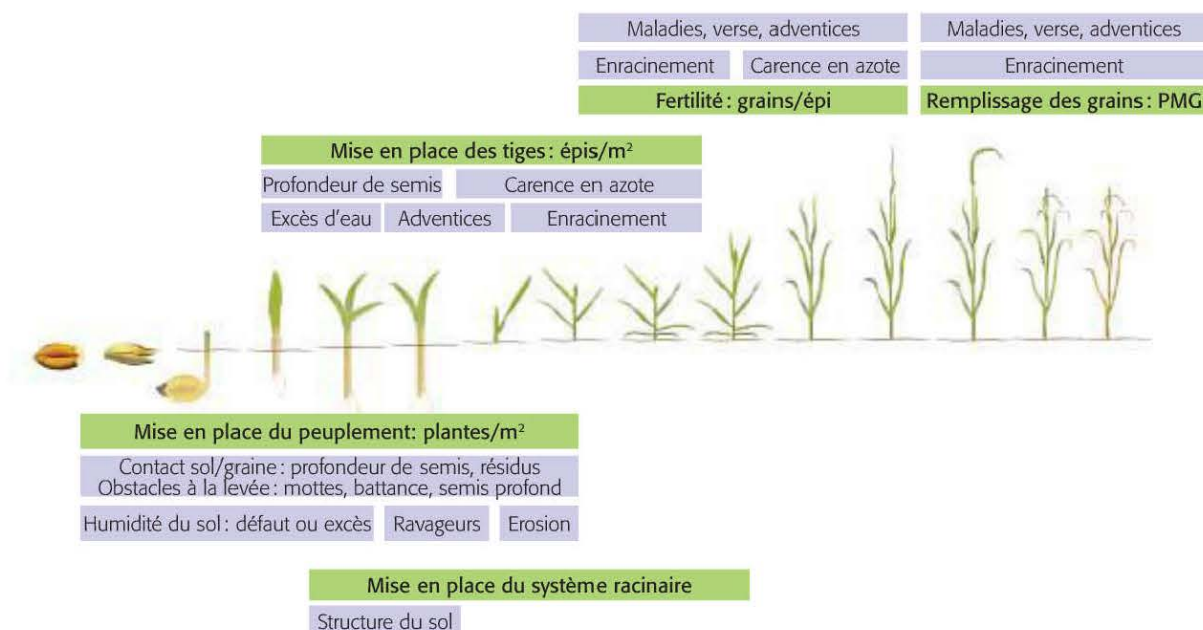
Travail du sol et rendement des cultures : conditions et modalités de mise en œuvre pour les principales espèces de grande culture

J. LABREUCHE, V. LECOMTE, G. SAUZET, N. LECLECH, C. LONGUEVAL, M. MARTIN,
G. ESCHENBRENNER, J. ROGER-ESTRADE.

La technique d'implantation des cultures, incluant les opérations de travail du sol et semis, impacte les conditions dans lesquelles la culture sera installée, en interaction avec le type de sol, le climat et le système de culture. Les différentes cultures se distinguent entre elles quant à leurs exigences vis-à-vis du lit de semences ou de l'état structural du sol.

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons avant tout sur les conséquences du travail ou du non-travail du sol, du semis et de la plantation sur la mise en place du peuplement végétal. Elles déterminent la nature et les propriétés de la couche de sol qui accueille les semences (le lit de semences) ou les plants et donc pour partie les conditions dans lesquelles le peuplement végétal pourra s'installer, en interaction avec la qualité des semences (ou des plants) et les conditions climatiques. D'autres paramètres pouvant impacter le rendement des cultures (figure 2.1), à l'instar de la structure du sol, seront également abordés mais le seront plus largement dans d'autres chapitres de cet ouvrage. Après un bref rappel des conditions à réunir pour réussir un lit de semences, nous passerons en revue les résultats acquis sur différentes espèces.

Dans les années 1950 à 1970, les travaux sur l'implantation des cultures ont beaucoup porté sur l'optimisation des conditions d'implantation après une préparation préalable comprenant un labour, éventuellement précédé d'un déchaumage, voire d'un sous-solage (Henin, 1955 ; Henin *et al.*, 1969 ; Dalleine, 1980). Mais à peu près à la même époque, ont été également explorées d'autres manières d'implanter les cultures, sans labour. Ces travaux ont également fait l'objet de nombreuses publications, dès les années 1970 en France, principalement sur blé suivant maïs,



PMG : poids de mille grains

Figure 2.1 : Impacts potentiels des techniques d'implantation sur les composantes de rendement. Exemple du blé.

mais aussi sur maïs (Boiffin *et al.*, 1976 ; Caneill et Bodet, 1994). Depuis le début des années 2000, les techniques sans labour connaissent un fort regain d'intérêt, qui a entraîné des évolutions considérables dans les types de matériels disponibles. Ces études ont comparé l'impact de différentes techniques d'implantation sur l'élaboration du rendement des cultures, dans un grand nombre d'essais analytiques ou de suivis de parcelles agricoles. Les résultats obtenus ont montré que l'on pouvait implanter avec succès des cultures à travers une grande diversité de modes de travail du sol, que les répercussions sur le rendement pouvaient être extrêmement variables et que le choix d'un type de travail du sol obéissait à un schéma de décision complexe faisant intervenir des considérations économiques, agronomiques et d'organisation du travail.

Le lit de semences

Pour que l'implantation d'une culture que l'on sème soit réussie, il faut viser en créant le lit de semences un certain nombre d'objectifs, que l'on peut classer en deux catégories : ceux portant sur les caractéristiques physiques du lit de semences (humidité, température, structure du sol) et ceux portant sur ses caractéristiques biologiques (pathogènes...).

Les objectifs à atteindre en matière d'état structural du lit de semences découlent des exigences de la graine pour accomplir les phases de germination et de levée (figure 2.2) : une fois le seuil de température atteint, il faut pour que la graine germe, satisfaire ses besoins en oxygène et en eau. Et, une fois la jeune plantule sortie, il faut permettre une levée rapide et régulière.

Le type de préparation du sol joue sur la température du lit de semences : en non-labour et en particulier en semis direct, le sol se réchauffe moins, surtout au printemps.

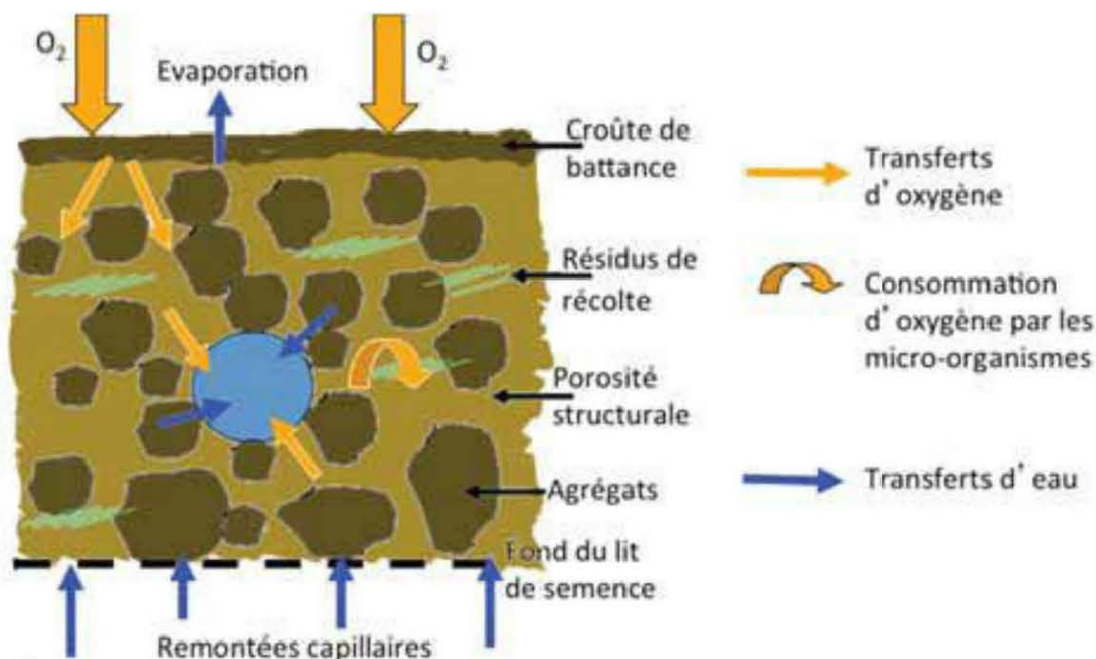


Figure 2.2: Environnement physique de la graine (d'après Richard et Boiffin, 1991).

Pour l'imbibition en eau de la graine, il faut veiller à assurer un bon contact terre-graine. Pour que ce dernier soit satisfaisant, le degré d'affinement de la structure du sol est déterminant (plus les agrégats sont de petite taille, meilleur est le contact en particulier avec des petites graines). La granulométrie du lit de semences dépend de nombreuses interactions entre le type de sol, les dates et types d'intervention, l'humidité lors de ces dernières, le climat... Dans les sols de texture intermédiaire à lourde (> 20 % d'argile), le labour et les reprises ultérieures génèrent fréquemment des lits de semences relativement motteux pour les semis d'été ou d'automne (figure 2.3). La faible durée d'exposition des sols aux alternances climatiques ne permet pas en effet une évolution suffisante des états initialement grossiers générés par les labours. En revanche, pour des semis de printemps, l'évolution naturelle des labours d'hiver y est plus favorable à l'obtention de lits de semences affinés (figure 2.3). Le roulage, qui permet de rappuyer le lit de semences, constitue également un levier pour favoriser le contact sol-graine. L'encombrement du lit de semences ou de la ligne de semis par des débris végétaux a aussi une forte influence sur le contact entre la terre et les semences. Il dépend quant à lui principalement de leur degré d'enfouissement, du précédent cultural et de la durée de l'interculture. En semis direct, la fermeture du sillon est très importante pour assurer un bon contact sol-graine. Des accidents peuvent survenir, dus à des conditions humides au semis, à l'absence préalable de travail du sol et à des équipements de fermeture du sillon insuffisants.

L'imbibition en eau de la graine nécessite par ailleurs une humidité suffisante du lit de semences, en partie conditionnée par les opérations finales de préparation par le travail du sol. En créant de la porosité et en enfouissant les résidus végétaux, il favorise l'évaporation de l'eau, ce qui est plutôt problématique à la fin de l'été (semis de colza par exemple), mais plutôt bénéfique en sortie d'hiver (semis d'orge de printemps par exemple). En situation présentant un fort risque d'évaporation

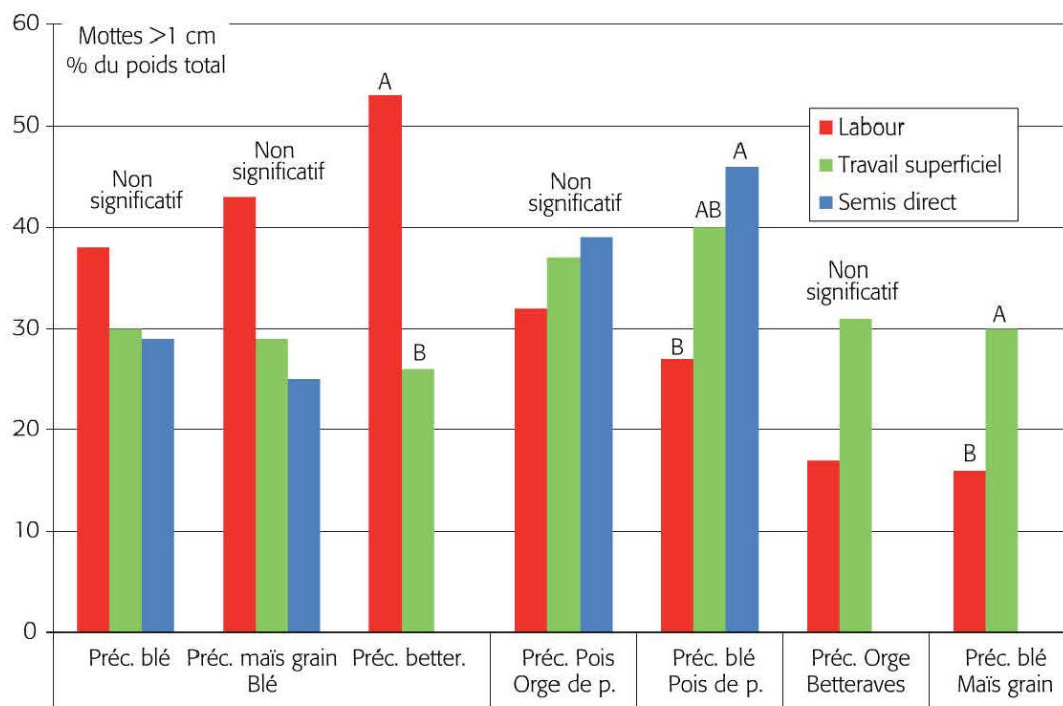


Figure 2.3: Proportion de mottes de plus de 1 cm dans le lit de semences, selon la culture installée et son précédent («Préc.»). Essai d'Arvalis - Institut du végétal sur le travail du sol de longue durée de Boigneville (limon argileux 24 % argile, labour d'hiver avant les cultures de printemps). Moyenne des campagnes 2004/2005 à 2006/2007. Les groupes de Newman Keuls au seuil de 5 % sont indiqués (leur puissance est limitée par les interactions pratiques*années).

du lit de semences, le semis direct peut constituer un avantage déterminant. Il est aussi possible de limiter la profondeur travaillée et de bien rappuyer le lit de semences afin de bénéficier de remontées capillaires des horizons sous-jacents vers le lit de semences.

Les conditions d'alimentation en oxygène dépendent de la porosité du lit de semences, qui assure les transferts de l'air, de l'eau et de la chaleur. Mais cela ne suffit pas : l'oxygénation de la semence dépend aussi de la présence ou non d'eau en excès dans les interstices poreux du lit de semences. Et, lorsque cette porosité est limitée, la présence de débris végétaux peut également jouer sur l'approvisionnement en oxygène de la graine : les microorganismes dégradant la matière organique sont pour la plupart aérobies et peuvent entrer en compétition avec la graine pour l'oxygène.

Enfin, il faut pour assurer une bonne levée, éviter la présence d'obstacles mécaniques à la levée qui peuvent prendre différentes formes : grosses mottes, quantité trop importante de débris végétaux (mulch très épais), profondeur de semis excessive, croûte de battance sèche créée avant la fin de la levée, voire recouvrement des plantules par de la terre en cas d'érosion dans la parcelle.

Concernant le volet biologique, un grand nombre d'ennemis des cultures peuvent affecter la germination (maladies fongiques) ou la levée (limaces, zabre...) des cultures. Le type de lit de semences créé et, plus largement, le système de travail du sol adopté, peuvent avoir une influence certaine sur ces risques. Ainsi, l'excès d'eau

favorise un certain nombre de pathogènes telluriques, responsables par exemple de la fonte des semis : favoriser l'évacuation de l'eau en excès permet de limiter ce risque. Les lits de semences trop creux favorisent les limaces et le non-labour peut entraîner une prolifération des rongeurs ou encore celle du zabre en culture de blé sur blé. Il faut donc aussi raisonner la préparation du lit de semences en ajoutant aux objectifs liés à la structure, ceux relatifs au contrôle des risques de développement de bioagresseurs.

En conclusion, on peut souligner trois caractéristiques importantes en matière d'implantation des cultures :

- il faut anticiper et tenir compte des évolutions possibles (dans les quelques jours qui suivent le semis) de l'état que l'on crée ;
- il faut dans la plupart des cas viser un compromis qui dépend des conditions locales : il n'y a donc pas de « recette » pour fabriquer un lit de semences idéal, mais une analyse raisonnée de chaque situation, qui doit mener au choix d'un itinéraire ;
- il n'existe pas une façon unique d'atteindre ces compromis et plusieurs combinaisons d'actions techniques peuvent mener à des résultats satisfaisants. Les décisions à prendre reposent sur la réalisation de compromis entre des objectifs souvent contradictoires. Par exemple, concernant le degré d'affinement de la structure, celui-ci ne doit pas être trop important en cas de risque de battance, mais doit être suffisant pour permettre un contact sol-graine adapté. De même, concernant le semis, on recherchera une profondeur plutôt importante quand on craint le sec, plus faible si le risque dominant est celui de la formation d'une croûte de battance avant la fin de la levée.

Les dispositifs étudiés

Pour illustrer les résultats obtenus sur différentes cultures, nous nous appuyerons sur différents dispositifs d'études : essais analytiques ou réseaux de parcelles d'agriculteurs.

Les techniques d'implantation le plus souvent mises en œuvre étaient :

- implantation sur labour. Cette pratique est représentative des habitudes locales en termes de profondeur de labour, de date de labour et de type de reprise. En général, un labour est pratiqué chaque année.
- implantation avec travail superficiel du sol. Au moins un travail entre 5 et 10 cm est réalisé chaque année, soit avec des outils de déchaumage non animés par la prise de force (disques, dents...), soit avec des outils animés par la prise de force (rotavator, herse rotative...).
- implantation en semis direct. Aucun travail du sol n'est réalisé avant le semis. Ce dernier est réalisé grâce à l'ouverture du sillon par des disques ou des dents. Le sillon est alors refermé par des dispositifs de rappui.

Plus ponctuellement, d'autres techniques ont été testées :

- le pseudo-labour (travail profond à 15-20 cm avec mélange des horizons mais sans retournement, avec un cultivateur par exemple) ;

- le décompactage (travail profond entre 20 et 35 cm de fissuration sans mélange ni retournement du sol avec un décompacteur) en complément d'opérations de travail superficiel ;
- le travail de la ligne de semis. Un travail superficiel de la ligne de semis est réalisé à l'aide d'outils animés avant le semis de cultures à fort écartement. C'est notamment le cas avec le rotasemis (rotalabour dont les lames ne sont présentes que sur les lignes de semis et qui est combiné à un semoir monograine). Cette technique a précédé la mise en place du strip till (travail du sol localisé sur le futur rang de semis). Cette dernière technique sera abordée dans un chapitre spécifique (chapitre 8).

Les références acquises sur le travail du sol sont fréquemment issues d'essais analytiques de moyenne à longue durée qui comparent différentes techniques d'implantation. Celles-ci ont été mises en œuvre plusieurs années de suite (de 2 à 43 années selon les essais). Ces techniques, qui se différencient sur les interventions de travail du sol et semis, sont comparées toutes choses égales par ailleurs. C'est-à-dire que les autres pratiques culturales (variétés, dates de semis, protection des cultures, fertilisation...) sont identiques, et *a priori* non limitantes de la production. Certaines interventions comme le désherbage sont calées sur la technique nécessitant le plus d'attention. Le suivi de ces essais comprend la plupart du temps l'ensemble des composantes de rendement et parfois des mesures complémentaires permettant d'en appréhender les facteurs limitants : pression sanitaire, structure du sol, distribution de la taille des mottes et humidité du lit de semences...

Ces essais analytiques en station ont leur intérêt : ils permettent un suivi très fin des effets des techniques et des comparaisons rigoureuses et solides au plan statistique. Mais ils ont également l'inconvénient d'être assez éloignés des conditions « normales » d'emploi des techniques. En effet, bien souvent l'expérimentation oblige à comparer toutes choses égales par ailleurs et empêche de mettre en place un système cohérent avec chacune des techniques de travail du sol comparée (en adaptant le programme de désherbage, le choix variétal, la date de semis, etc). Il faut donc soit envisager d'autres formes d'expérimentation (les essais systèmes, mais ces derniers sont peu nombreux car plus lourds à mettre en place et à suivre)

Tableau 2.1 : Composantes de rendement du blé (différentes variétés selon les années), précédent maïs grain non irrigué. Essai travail du sol de Boigneville en limon argileux sain. Valeur moyenne pour la période 1980 à 1996 (sauf 1982 et 1983). Groupes de Newman Keuls au seuil de 5 % entre parenthèses.

	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Peuplement à la levée (pl/m ²)	288 (a)	299 (a)	279 (a)
Taux de levée (%)	75.0 (a)	75.8 (a)	70.4 (b)
Nombre d'épis/m ²	508 (b)	549 (a)	540 (a)
Nombre de grains/épi	37.8 (a)	35.0 (b)	35.7 (b)
Nombre de grains/m ²	19 056 (a)	19 161 (a)	19 140 (a)
PMG (g)	43.6 (a)	42.9 (a)	43.3 (a)
Rendement (q/ha)	82.3 (a)	81.5 (a)	82.1 (a)
Date stade épi 1 cm	6 avril (a)	6 avril (a)	6 avril (a)
Date épiaison	26 mai (a)	26 mai (a)	26 mai (a)

soit compléter l'étude par le suivi de parcelles d'agriculteurs. En Lorraine, les Chambres d'Agriculture ont mis en place un réseau de comparaison en bandes sur 25 parcelles de la région : la technique du semis direct sous couvert est alors comparée à la conduite classique (labour ou travail simplifié selon le type de sol ou les contraintes de l'agriculteur). Les parcelles sont coupées en deux et maintenues dans l'une ou l'autre des techniques durant les six années de l'expérimentation. En région Midi-Pyrénées, dans le cadre du projet CASDAR « TTSI » animé par la Chambre régionale d'Agriculture, 30 exploitations utilisant des techniques très simplifiées d'implantation ont été suivies. Les comparaisons aux techniques d'implantation traditionnelles se font soit à dire d'expert, soit sur la base de références régionales.

Résultats obtenus sur céréales à pailles

Les résultats présentés dans le tableau 2.1 montrent que l'on peut réussir l'installation du blé avec ou sans labour. Mais ces essais ont également mis en évidence un risque plus élevé d'échec au semis lorsque l'implantation est réalisée sans labour dans les sols hydromorphes ou humides, en particulier s'ils présentent une faible stabilité structurale (tableaux 2.2 et 2.3). Cette limite concerne le blé mais plus encore l'orge d'hiver ou le colza. Une mauvaise structure du sol en condition humide peut augmenter le risque d'asphyxie racinaire avec des conséquences sur le rendement (Soane *et al.*, 2012 ; Stengel *et al.*, 1984). Ainsi, en non-labour il faut veiller à éviter les situations entraînant un tassement des horizons du profil cultural situés sous le lit de semences et donc limitant l'infiltrabilité. En effet, cela joue de manière très importante sur les conditions de germination et de levée en prévenant l'engorgement des horizons superficiels, en améliorant la vitesse de leur réchauffement, en diminuant les risques de battance (d'autant plus élevés, à stabilité structurale égale, que la surface du sol est humide). Les techniques sans labour trouvent donc surtout leurs limites en conditions de semis humides (semis tardifs ou automnes humides). Lorsque le risque d'excès d'eau est trop important,

Tableau 2.2 : Résultats d'essais travail du sol sur blé (rendement aux normes en % du labour ; nombre d'essais entre parenthèses). Essais réalisés principalement en limon argileux sain, limon sain et limon hydromorphe.

Précédent	Type de sol	Travail superficiel	Semis direct
Tous	Tous	99.1 % (34)	98.3 % (29)
	Sols sains	99.4 % (26)	99.2 % (21)
Tous	Sols humides ou hydromorphes	98.2 % (8)	95.8 % (8)
Maïs grain		99.4 % (8)	96.8 % (8)
Blé		98.9 % (7)	97.4 % (4)
Betteraves sucrières	Tous	99.0 % (3)	100.2 % (3)
Colza		96.4 % (3)	99.6 % (3)
Tournesol		100.8 % (3)	101.9 % (3)
Protéagineux		99.4 % (10)	97.6 % (8)

le labour est alors fréquemment utilisé juste avant le semis, de manière à semer sur une terre un peu moins humide.

Par ailleurs, les orges ou les blés d'hiver implantés sur un précédent blé sans labour peuvent pâtir de difficultés liées à la gestion des pailles (tableaux 2.2 et 2.3) qui perturbent la levée. Ce point sera traité dans le chapitre 9. Des difficultés sanitaires sont aussi à craindre, en particulier en blé sur blé. Différentes expériences ont montré qu'une réduction du travail du sol peut y favoriser certains ennemis des cultures : graminées adventices, maladies comme l'helminthosporiose du blé, zabre...

Dans le cas de blés implantés derrière maïs grain, des difficultés ont parfois été rencontrées avec les résidus de récolte en particulier derrière maïs grain irrigué (résidus très abondants). Cette situation est très bien gérée avec un travail superficiel du sol (type Rotavator, Semavator). En revanche, en semis direct avec des éléments semeurs à disques, on évite de broyer à la récolte ou avant le semis car des résidus plaqués au sol risqueraient d'être poinçonnés dans le sillon. Mais sans broyage avec des résidus abondants, on a alors une très forte quantité de résidus sur les anciens rangs de maïs qui peut pénaliser la levée du blé. Pour limiter ce risque, il est alors important de recroiser le semis de la céréale avec les anciens rangs de maïs avec un angle suffisant (à condition que le parcellaire le permette). Sur l'essai de longue durée de Boigneville où il n'est pas possible de croiser le sens du semis et de la récolte, Arvalis a comparé le broyage des résidus post-semis au non-broyage (Labreuche et Closset, 2012 ; chapitre 9). Le broyage a permis une meilleure répartition des résidus de maïs, une plus grande régularité du peuplement de blé, une forte limitation de la perte de rendement par rapport aux autres techniques ainsi qu'une réduction de la quantité de mycotoxine observée sur grain.

Sur orge de printemps, des résultats plus variables ont été obtenus. Sur la station de Boigneville ou dans les environs, cinq essais de longue durée réalisés par Arvalis ont comparé des techniques d'implantation (tableau 2.4). En moyenne, aucun écart de rendement significatif n'est ressorti entre labour, travail superficiel et semis direct. Cependant, quelques difficultés de levées sont observées sur un précédent pailles restituées, en semis direct pratiqué lors de printemps sec. Le

Tableau 2.3 : Rendement relatif du semis direct sous couvert comparé soit à du labour (lab), soit à du travail superficiel (TCS). Réseau animé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine.

	Blé	Colza	Orge d'hiver	Orge de printemps
	% rdt/lab	% rdt/lab	% rdt/lab	% rdt/lab
argilo-limoneux, limoneux, calcaires (sains)	103	91	98	93
sols hydromorphes	81	83	87	90
sableux	106	94		
	% rdt/TCS	% rdt/TCS	% rdt/TCS	% rdt/TCS
argilo-calcaire superficiel	99	116	97	
argilo-limoneux, limoneux, calcaires (sains)	100	96	92	90
sols hydromorphes	98	93	102	64
sableux	102	90		

Tableau 2.4: Résultats d'essais travail du sol sur orge de printemps (rendement aux normes ; groupes de Newman Keuls au seuil de 5 % entre parenthèses). Essais réalisés en limon argileux sain.

Lieu	Précédent	Années (début diffé- renciation)	Labour (q/ha)	Travail superficiel (q/ha)	Semis direct (q/ha)
Boigneville (91)	Pois de printemps ou Féverole d'hiver CV depuis 2009	1998/2013 (1971)	76.6 (a)	75.8 (a)	77.4 (a)
	Blé pailles restituées	1993/2011 (1992)	70.0 (a)		69.7 (a)
	Blé pailles restituées CV	1993/2011 (1992)	70.4 (a)		69.4 (a)
Nangeville (45)	Blé pailles restituées	1994/1996 (1994)	61.7 (a)	59.7 (a)	
Coudray (45)	Blé pailles restituées	1990/1997 (1990)	63.9 (a)	62.1 (a)	61.0 (a)

CV = Couvert en interculture dans la rotation

ressuyage des terres au printemps est un peu plus lent en surface dans les situations où la couverture du sol est importante (semis direct, couvert végétal développé ou détruit tardivement). Dans ces situations, il est alors fréquent de semer sur un sol limite en termes de ressuyage. La qualité moyenne du lit de semences (mottes dans la ligne de semis voire sillon mal refermé, pailles incorporées dans le sillon) est alors pénalisante s'il ne pleut pas suffisamment après le semis. Dans les essais cités plus haut, les capacités de tallage de l'orge ont permis de compenser les difficultés parfois rencontrées à la levée. En revanche, le réseau suivi par la Chambre d'Agriculture de Lorraine (Leclech, 2012) a mis en évidence des pertes de rendement assez élevées sur orge de printemps (tableau 2.3). Cela est particulièrement vrai en sol hydromorphe (conditions de semis) mais concerne aussi des sols plus sains : des pertes conséquentes à la levée, déjà évoquées plus haut, expliquent ces résultats (en moyenne sur neuf situations : 33 % de pertes de pieds avec travail du sol et 45 % en semis direct sous couvert).

Résultats obtenus sur maïs

Le maïs est une culture exigeante en termes d'implantation et de qualité structurale du sol. Il est sensible à la compaction des sols et ne possède pas de grandes capacités de compensation en cas de mauvaise levée, à l'opposé des cultures capables de taller ou ramifier.

Une synthèse de 21 essais est présentée sur le tableau 2.5. Onze essais ont été réalisés derrière une céréale à paille et dix derrière un maïs grain. Derrière une paille, les moyennes des rendements ne diffèrent pas entre non-labour et labour. En revanche, en maïs sur maïs, les résultats sont moins favorables à l'absence de labour. Les résultats obtenus sans labour sont plus favorables en présence de travail profond mais seul un faible nombre de références permet d'en attester. Cette

Tableau 2.5 : Résultats d'essais travail du sol sur maïs (rendement aux normes en % du labour ; nombre d'essais entre parenthèses). Essais réalisés principalement en limon argileux sain, limon sain, limon hydromorphe et sol de gravier.

Précédent	Pseudo-labour	Décompactage + Travail superficiel	Travail superficiel	Travail de la ligne de semis	Semis direct
Blé	100.9 (1)	100.6 (2)	98.9 (9)	99.0 (8)	98.8 (1)
Maïs grain	98.0 (3)	101.1 (2)	94.8 (7)	88.9 (3)	

tendance est cependant confirmée par Longueval *et al* (2006) qui ont comparé des parcelles implantées sur labour ou non-labour profond (sur pseudo-labour ou décompactage) ou en non-labour superficiel, situées pour l'essentiel dans des sols limoneux de Midi-Pyrénées en monoculture de maïs.

Ces différences de comportement du maïs selon son précédent peuvent s'expliquer par deux facteurs :

- la gestion des résidus du précédent est plus facile derrière un blé qu'un maïs grain, en particulier si ce dernier est irrigué (beaucoup de résidus). Les pailles de blé ou d'orge disposent d'un délai assez long pour se décomposer (environ 8 mois). Dans le cas du maïs, ce délai est inférieur (5 mois environ). C'est d'ailleurs souvent la tige de maïs ou le collet de la plante qui prennent du temps pour assurer leur décomposition et qui peuvent gêner le contact sol-graine. La technique du mulchage (broyage et déchaumage précoces en automne) est à même de faciliter la décomposition du précédent maïs grain et ainsi le semis sans labour par la suite ;
- la qualité structurale du sol semble fréquemment constituer un facteur limitant derrière un précédent maïs. Le risque de compaction à la récolte est plus élevé sur maïs que sur blé. Par ailleurs, la période hivernale est peu propice à la restructuration naturelle des sols, au contraire de la période estivale où le dessèchement

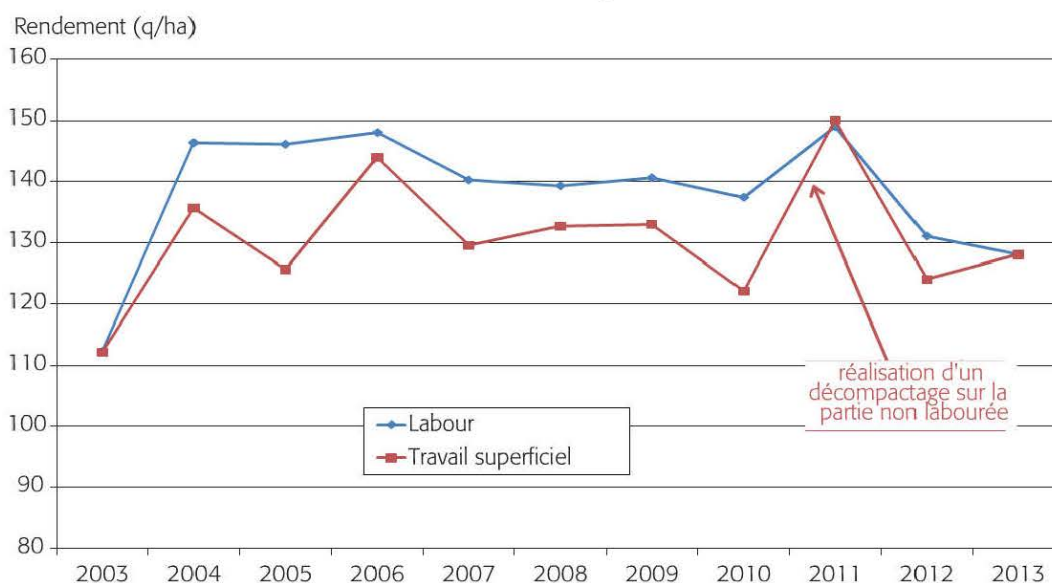


Figure 2.4 : Rendement d'un maïs grain irrigué, précédent maïs grain. Essai réalisé à Lyon Saint-Exupéry (69) sur sol d'alluvion fluvio-glaciaire (gravier).

du sol favorise sa fissuration si le sol contient un minimum d'argile. C'est ainsi qu'une rotation maïs-blé présente un état structural généralement nettement plus favorable qu'une monoculture de maïs. L'irrigation d'une monoculture amplifie ce risque en limitant le dessèchement estival du sol. L'observation de la structure du sol et/ou de l'enracinement du maïs reste indispensable pour faire le point sur les besoins en travail profond (labour ou pseudo-labour ou décompactage). Des profils d'enracinement ont par exemple permis de déceler un moindre enracinement en non-labour dans un essai à Lyon Saint-Exupéry (figure 2.4), alors qu'il semblait que le sol de gravier était peu sensible au tassement. La réalisation d'un seul décompactage dans l'essai avant le semis 2011 a comblé l'écart de productivité entre les deux techniques les trois années suivantes. Le même type d'observation est à réaliser dans les sols sensibles à la reprise en masse (ex : limons battants hydromorphes pauvres en matières organiques) ou dans les systèmes avec risque de tassement des sols (ex : polyculture élevage).

Dans des situations où aucun facteur limitant majeur ne perturbe les différentes techniques d'implantation du maïs, les composantes de rendement sont très proches entre elles (tableau 2.6). En revanche, la plus forte inertie thermique du sol en cas de non-travail du sol ralentit le rythme de développement du maïs pendant les stades précoces (semis à 6 feuilles) lorsque l'apex est situé sous la surface du sol. Le retard pris n'est pas comblé à la floraison ou à la récolte (humidité du grain). Par rapport au labour, ce retard est particulièrement important en semis direct (sans travail du sol) mais nettement plus faible en cas de travail superficiel du sol (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Composantes de rendement d'un maïs grain irrigué, précédent blé. Essai travail du sol de Boigneville en limon argileux sain. Valeur moyenne pour la période 2003 à 2013.

	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Peuplement à la levée (pl/ha)	92 358 (a)	91 941 (a)	84 813 (b)
Taux de levée (%)	92.4 (a)	91.9 (a)	84.8 (b)
Nombre d'épis/ha	89 152 (a)	87 625 (ab)	83 315 (b)
Nombre de grains par épi	374 (b)	392 (ab)	403 (a)
Nombre de grains par m ²	3 330 (a)	3 426 (a)	3 348 (a)
PMG (g)	281 (a)	280 (a)	279 (a)
Rendement (q/ha)	95.0 (a)	97.2 (a)	94.2 (a)
Humidité à la récolte (%)	25.8 (b)	26.1 (b)	28.6 (a)

Groupes de Newman Keuls au seuil de 5 % entre parenthèses.

Résultats obtenus sur colza

La réussite de l'implantation d'un colza est évaluée par sa vitesse de levée, la structure du peuplement obtenue et la qualité de la croissance racinaire, du pivot en particulier. L'objectif est d'obtenir un colza au stade 4 feuilles durant la dernière décade de septembre, un pivot de 15 centimètres en octobre et une structure de peuplement homogène, dans le but d'obtenir rapidement une croissance aérienne suffisante pour concurrencer les adventices, d'avoir des plantes résistantes aux insectes d'automne et une culture dont le potentiel ne sera pas limité par son implantation.

Tableau 2.7: Bilan agronomique de différentes cultures en semis direct (SD) ou non-labour très superficiel (NLts). Réseau animé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (projet CasDAR TTSI 2008-2012)

Facteurs limitant le rendement en SD-NLts	Implantation - Peuplement	Salissement	Expression du potentiel du sol	Synthèse
Blé	Non limitant (tallage important)	Maîtrise	Bonne	
Colza	Non limitant (ramifications)	Maîtrise	Bonne	
Pois	Limitant	Difficile à maîtriser	Limité	
Maïs irrigué	Non limitant (bonne levée en SD)	Maîtrise	Variable, bonne en potentiel moyen	
Tournesol	Limitant	Difficile à maîtriser en prélevée mais possibilité en postlevée	Moyenne	
Sorgho	Limitant (tallage insuffisant)	Difficile à maîtriser	Bonne	
Soja irrigué	Non limitant (ramifications)	Maîtrise	Bonne	

bonne adaptation
 adaptation moyenne
 mauvaise adaptation de la culture

La gestion de l'interculture influence la réussite de ces objectifs et doit être adaptée au contexte pédoclimatique. Cette gestion doit permettre d'éviter un assèchement, trop rapide du lit de semences, son encombrement par les résidus, la création de mottes et les tassements (profonds et superficiels). Il faut également veiller à éviter des préparations menant à un lit de semences trop « creux » qui favorise l'évaporation mais aussi la prolifération des limaces. L'installation du colza est dépendante du contexte et doit se raisonner dans la rotation après avoir évalué et hiérarchisé les facteurs limitant sa réussite (tableau 2.8).

En sols sableux et limoneux, les réussites sont fréquentes avec le labour repris à la dent ou avec un semis derrière la charrue et encore sans labour en situation de travail à la dent (de 8 à 15 centimètres selon la profondeur du sol).

En sols argileux, l'attention doit être toute autre pour éviter les accidents précités. Le labour est déconseillé dans la mesure où la création de mottes peut être dangereuse et rédhitoire. Le risque est en particulier élevé lors d'étés très peu arrosés, en particulier en août. Un précédent orge d'hiver, autorisant un labour précoce, permet d'atténuer ce risque. La qualité de la reprise de labour est également fondamentale dans la réussite du chantier. Souvent effectuée avec une herse rotative, elle crée des sols soufflés difficiles à tasser mécaniquement, donc limitant le contact sol-graine et créant des ruptures de porosité préjudiciables. Assèchement profond, sols soufflés, porosité hétérogène, même lorsque le chantier est parfaitement conduit, sont des facteurs de risques, en particulier en été peu arrosé. Ces effets néfastes sont exacerbés lorsque la reprise de labour n'est pas effectuée au moment opportun pour cause de récolte de colza et de blé. C'est pourquoi on pourra

Tableau 2.8 : Adaptation des techniques d'implantation du colza d'hiver au type de sol et au risque désherbage. La limite entre les sols se situe approximativement à une teneur en argile de 20 %. Source : Cetiom.

	Sol argileux, risque Geranium réduit	Sol argileux, risque Geranium élevé	Sol sableux ou limoneux, bonne structure	Sol sableux ou limoneux, mauvaise structure
Labour				
Travail profond (8-15 cm et plus)		Risque adventices		
Travail superficiel (8 cm au plus)			Structure de qualité	
Semis direct	Si bonne structure	Si bonne structure		
Strip till	Strip till et semis peuvent être décalés		Passage simultané strip till et semoir	

Pratique conseillée
 Pratique conseillée sous réserve
 Pratique déconseillée

choisir en sol argileux plutôt un travail sans labour et précoce (un ou deux passages selon les besoins) avec un outil à dents (chisel ou canadien) très vite appuyé par un passage de rouleau pour éviter l'évaporation. Toute autre action mécanique plus tardive est à proscrire sous peine d'assécher plus profondément le sol.

Le semis direct peut être une alternative intéressante, en particulier lorsque le risque d'enherbement en dicotylédones est important (exemple des Geranium en sol argilo-calcaire). Un semis plus précoce, à très faible vitesse (5-6 kilomètres par heure) pour éviter le flux de terre et la pollution de l'interrang, avec un semoir équipé de chasse débris pour nettoyer la ligne de semis est indispensable pour obtenir les résultats escomptés tant en termes de limitation de la germination que de qualité de la levée. Bien entendu un examen préalable de la qualité de la structure est nécessaire. En cas de structure du sol défaillante, la gestion du travail profond se fait dans la rotation, en particulier avant l'installation de la culture qui précède le colza. Lorsque l'on identifie un problème de rongeurs ou de limaces, le choix du semis direct peut être remis en cause et nécessiter une intervention mécanique (si le risque adventice est réduit).

En Lorraine, dans les parcelles adaptées au travail du sol superficiel, le colza mené en semis direct sous couvert se comporte aussi bien que dans les situations travaillées si l'implantation est maîtrisée (gestion des pailles et des ravageurs). Par contre, en sols hydromorphes à très hydromorphes, le labour crée une structure permettant de limiter l'asphyxie racinaire de surface. Le semis direct sous couvert y est beaucoup moins adapté (tableau 2.3) : les pertes de rendement peuvent être conséquentes et rédhibitoires (Leclech, 2012). La pratique du semis direct mérite une attention particulière en sols hydromorphes mais reste possible lorsque la qualité de structure est préservée dans un sol à bonne activité biologique, en particulier lorsque le risque de prolifération d'adventices est important.

La fissuration sur la ligne de semis (ou strip till) est une bonne alternative au semis direct ou au travail du sol à la dent sur colza. La gestion du chantier est à

adapter au type de sol. En sols peu argileux (taux inférieur à 20 %), le semis et la fissuration peuvent être simultanés sans risque trop important de manque de terre fine, de mauvais positionnements de la graine. Toutefois il faut être attentif à la mauvaise fermeture du rang en situation trop plastique, qui peut nécessiter de repousser la date de semis. En revanche, en sol argileux, selon l'état hydrique du sol, les chantiers de fissuration et de semis peuvent être décalés. À un passage précoce de strip till en situation homogène de sol sec succède alors le semis avec un semoir à disques, sur un sol évolué avec un minimum suffisant de terre fine. La gestion dans ce contexte pédologique est plus délicate, en particulier si le strip till est réalisé fin juillet-début août avec des possibilités d'évolution moins importantes qu'obtenu avec un passage plus précoce derrière orge d'hiver. Un déchaumage précoce peut s'avérer nécessaire pour contrôler rongeurs et limaces.

Résultats obtenus sur tournesol

Le tournesol est une culture très exigeante vis-à-vis de l'implantation, tant au niveau du peuplement levé (densité, régularité) que de la qualité d'enracinement (longueur du pivot). Les 16 essais de densité réalisés par le Cetiom dans le sud de la France en 2011 et 2012 confirment que le peuplement levé doit être compris entre 50 000 et 60 000 plantes par ha pour ne pas pénaliser le rendement mais aussi la teneur en huile. Pour atteindre ce seuil de 50 000 plantes par ha, la densité de semis doit être comprise entre 65 000 et 70 000 graines par ha en labour et non-labour profond.

Les techniques d'implantation du tournesol ont fortement évolué au cours des trente dernières années. En complément du labour qui représentait 64 % de la sole en 2013, le non-labour profond s'est fortement développé, en particulier dans le Sud-Ouest (29 % des surfaces de tournesol en 2013 dans le Sud-Ouest, contre 20 % au niveau national). Les techniques très simplifiées d'implantation (8 % des surfaces du Sud-Ouest, 16 % en France) recouvrent une large diversité d'itinéraires de préparation, que l'on peut classer en trois groupes :

- le semis direct ou le non-labour très superficiel (< 5 cm) sont des techniques qui restent marginales en tournesol ;
- le non-labour superficiel (5-15 cm) ;
- le travail du sol localisé sur la ligne (strip-till) qui commence à se développer en France (moins de 2 % de la sole en 2013).

Réalisés dans le cadre d'un projet en 2008-2012¹, des suivis de parcelles (tableau 2.7) ont montré que le tournesol en travail superficiel (5-10 cm) présente globalement des résultats insuffisants avec des densités levées trop irrégulières et souvent trop faibles (10 à 15 points en dessous des taux de levée en labour ou non labour profond). Parmi les principaux éléments en cause, on relève : des défauts du lit de semences (mauvaise fermeture du lit de semences dû à des conditions trop plastiques, insuffisance de terre fine pour recouvrir les graines et refermer le sillon,

1. Casdar TTSI 2008-2012 (animation par la Chambre régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées et synthèse par le Cetiom des suivis sur cultures oléagineuses)

amas de paille ou menues pailles dans la ligne de semis) et un parasitisme du sol défavorable. Les limaces noires en particulier posent problème, y compris lors de printemps secs comme en 2011 (Longueval *et al.*, 2013).

Ainsi un travail du sol (labour, déchaumage profond...) préalable au semis du tournesol, réalisé dès l'automne en sol à comportement argileux, semble indispensable. Les couverts végétaux doivent être détruits au moins deux mois avant la date de semis prévue. La protection anti-limaces doit associer une application en plein en surface et en localisé dans la ligne de semis. Le semoir monograine est indispensable. Il doit être adapté aux implantations sans labour avec, en particulier, un chasse débris rotatif à l'avant de l'élément semeur et un système de fermeture de la ligne efficace. La densité de semis doit être augmentée à 70 000-75 000 graines par ha. Le remplacement du précédent céréales à pailles par le sorgho semble sécuriser l'implantation du tournesol en travail superficiel du sol (risque limace moindre, résidus plus faciles à gérer).

Des travaux ont montré sur sol argileux en Midi-Pyrénées que les pertes de rendement par rapport au labour sont moins importantes en non-labour profond, sur pseudo-labour ou décompactage, qu'en non-labour superficiel (Longueval *et al.*, 2006). En cause, un meilleur enfouissement des pailles, un meilleur ressuyage du sol en surface au printemps et une structure de sol plus favorable au pivot du tournesol.

Le travail du sol localisé sur la ligne, ou strip-till, offre de nouvelles perspectives pour l'implantation du tournesol.

Résultats obtenus sur pommes de terre

Au sein des grandes cultures, la pomme de terre possède deux spécificités majeures qui impactent directement la préparation de sol :

- les semences plantées ne sont pas des graines de petite taille mais des tubercules dont le calibre varie généralement de 25 à 50 mm,
- le développement harmonieux des tubercules fils nécessite un volume de terre fine suffisant (buttes ou billons) de façon à obtenir un grossissement régulier à l'abri de la lumière.

Ceci oblige à disposer d'un volume important de terre suffisamment émiettée lors de l'implantation de la culture. Cet objectif est obtenu grâce à une préparation de sol énergique sur une épaisseur de 15 à 20 cm. Les outils utilisés sont désormais le plus souvent des outils animés à axe rotatif horizontal (fraise) dans les sols les plus argileux, ou vertical (herse rotative) dans les sols les plus légers. Ils assurent l'obtention d'une granulométrie fine en un minimum de passage. Cette préparation profonde permet de plus en plus fréquemment d'assurer un buttage définitif dès la plantation, supprimant de ce fait l'opération de buttage complémentaire habituellement réalisée deux semaines environ après plantation. Dans certains secteurs, initialement les plus caillouteux, est pratiqué le tamisage qui parvient au même résultat de structure après billonnage d'automne et/ou de printemps et reprise par une tamiseuse avant plantation.

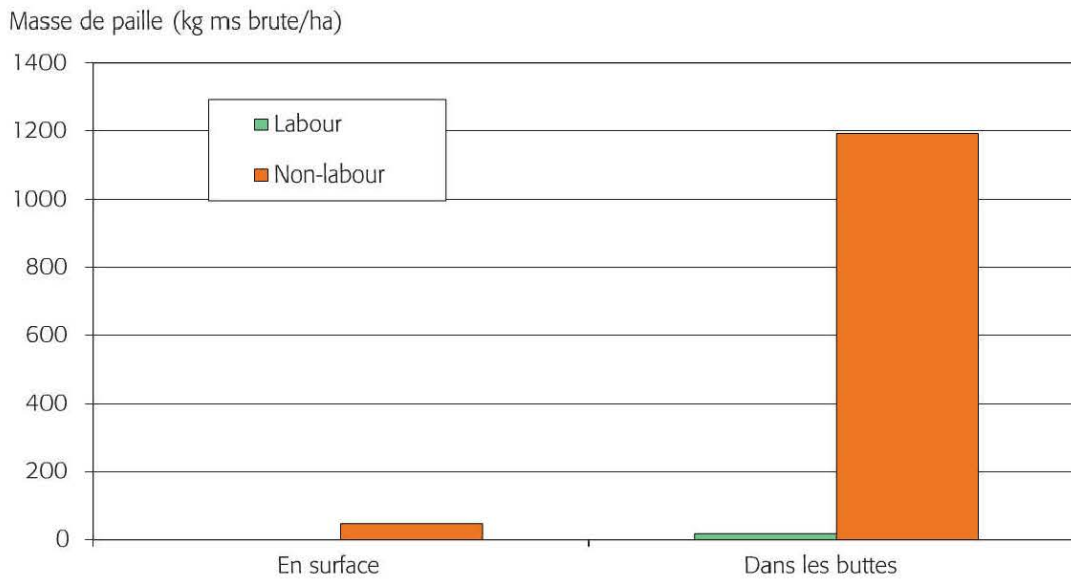


Figure 2.5: Quantité de paille non décomposée évaluée en système labouré et non labouré après buttage définitif de la culture de pomme de terre (ARVALIS-ITPT 2002). Effet travail du sol significatif en surface (seuil 5 %) et hautement significatif dans les buttes (seuil 1%).

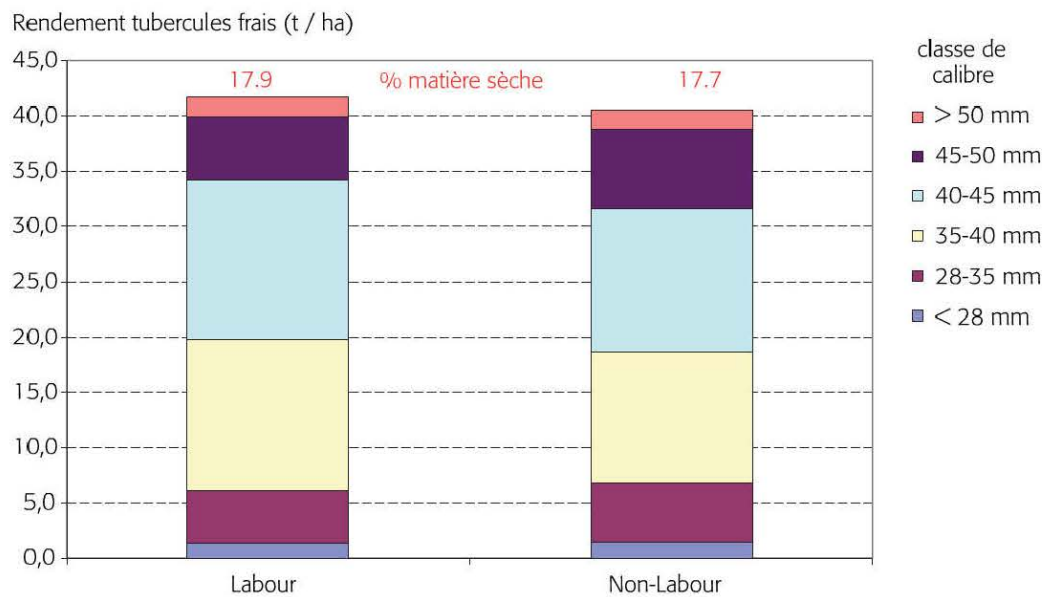


Figure 2.6: Effet de deux modes de travail du sol sur le rendement (Essai Dedours 2002, variété Bintje, Arvalis - ITPT 2002). Différences non significatives, seuil 5 %.

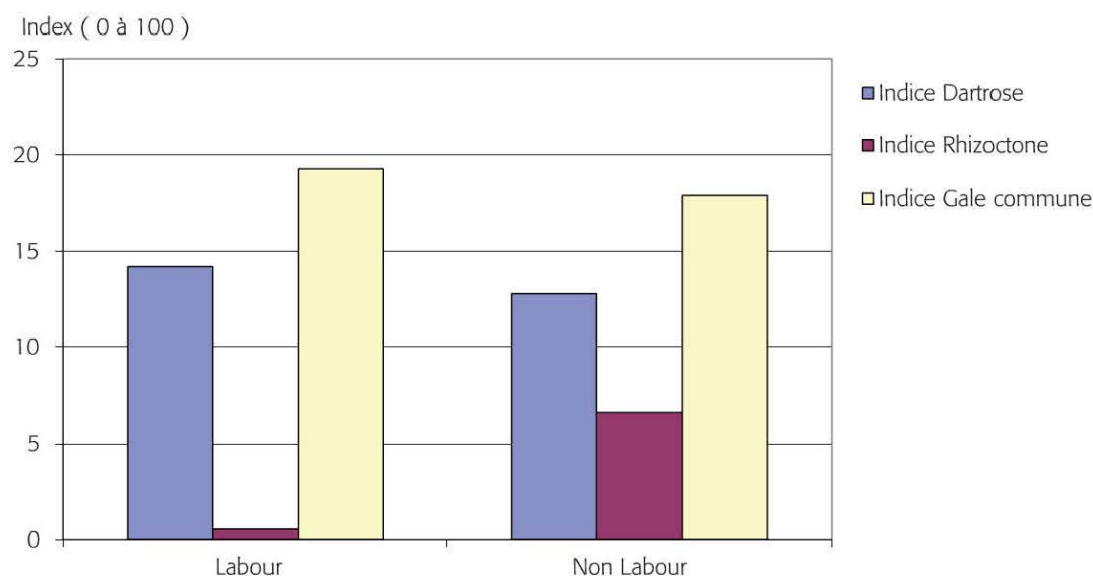


Figure 2.7 : Effet de deux modes de travail du sol sur la qualité de présentation des tubercules (Essai Dedours 2002, variété Bintje, Arvalis - ITPT 2002). Différences non significatives, seuil 5 %.

Cette préparation profonde passe par un ameublissement préalable pour faciliter le ressuyage du profil et l'action des outils de préparation. Celui-ci diffère en fonction du système de culture pratiqué : labour, d'hiver le plus souvent, en système labouré, ou décompactage d'automne en système non labouré.

Quel que soit le cas de figure la proportion d'éléments fins observés dans les buttes est élevée avec au moins 30 % d'agrégats de moins de 2 mm de diamètre et plus de 50 % inférieurs à 5 mm grâce à la mise en œuvre de ces outils animés. Tout au plus en système non labouré détecte-t-on une part plus importante de résidus non décomposés dans l'horizon préparé, pailleux en précédents céréaliers (figure 2.5). Cette présence accrue semble être à l'origine d'un accroissement du risque de contamination des tubercules fils par le rhizoctone brun (figure 2.7) alors qu'aucune différence de productivité n'a été mise en évidence entre les deux modes d'implantation (figure 2.6). En système non labouré, la préparation de sol profonde favorise une certaine redistribution des éléments minéraux et de la matière organique sur les 15 premiers centimètres du profil. Ces derniers restent néanmoins plus concentrés dans cet horizon comparativement à une distribution très homogène observée sur 30 cm en système labouré.

Dans la mesure où la pluviosité hivernale n'est pas trop abondante et ne conduit pas à refermer le labour d'hiver, celui-ci contribue le plus souvent à un ressuyage plus rapide du profil en profondeur favorable aux implantations précoces. Les derniers travaux de recherche montrent d'ailleurs que, d'un point de vue structural, c'est l'existence d'un tassement profond qui est susceptible d'affecter le plus le développement et la croissance de la culture, surtout si son effet n'est pas gommé par la pratique d'une irrigation satisfaisant les besoins de la plante.

Conclusion : aptitude des cultures à une implantation sans labour

L'implantation de cultures avec des techniques très simplifiées (travail très superficiel, semis direct...) a globalement des conséquences variables selon le type de cultures. C'est que ce que nous enseignent différents dispositifs d'acquisition de références (essais analytiques, essais systèmes de culture et observatoires). En effet, une forte réduction du travail du sol peut parfois être synonyme de lit de semences moins favorable à la levée ou de structure du sol présentant moins de porosité qu'en technique conventionnelle. La capacité intrinsèque de la culture à croître dans cet environnement et à éventuellement compenser un défaut de peuplement est déterminante et explique les différences de comportement entre cultures.

Au niveau de l'installation du peuplement, trois critères peuvent différencier les cultures et leurs précédents : la quantité de résidus présente lors du semis, la capacité des semences à lever dans un lit de semence défavorable (motteux, absence de terre fine, présence de résidus dans la ligne de semis ...) et la capacité à compenser un éventuel manque à la levée (tableau 2.9). De fortes différences sont perceptibles entre cultures. Certaines difficultés d'implantation en techniques très simplifiées peuvent être évitées en adaptant son système de culture, par exemple en implantant une culture délicate comme le colza d'hiver derrière un protéagineux plutôt que derrière une céréale à paille.

Au cas où la structure du sol ne serait pas optimale (type de sol, système de culture), les cultures ont des aptitudes très diverses à croître correctement : enracinements plus ou moins pénalisés, risque d'asphyxie hivernale.

De manière générale, les cultures d'automne sont plutôt mieux adaptées aux implantations très simplifiées que les cultures de printemps. Les cultures graminées (céréales à pailles, maïs) le sont également plus que la plupart des cultures dicotylédones (pois, colza, tournesol).

Pour mémoire, dans le tableau 2.9, nous rappelons quelques points forts des techniques simplifiées, en comparaison aux techniques traditionnelles. Ces dernières présentent également leurs limites.

Face à tous ces écueils potentiels et aux multiples interactions entre les techniques d'implantation, les types de sol et les cultures, chaque agriculteur doit s'adapter. La majorité alterne les techniques selon les cultures, les conditions de l'année... D'autres choisissent de réduire voire de supprimer le travail du sol dans tous les cas. De nombreuses adaptations sont alors nécessaires, en particulier en « période de transition » : plus d'anticipation des difficultés potentielles, plus de technicité et d'observation, choix des matériels, adaptation du système de culture...

Tableau 2.9: Appréciation de l'adaptation des cultures aux techniques d'implantation très simplifiées (travail très superficiel, semis direct...). D'après les résultats Arvalis, Cetiom, ITB et réseaux CRA Lorraine et CRA Midi-Pyrénées.

Culture	Précédent	Peuplement			Structure du sol		Rendement	Facteurs limitants potentiels en techniques d'implantation très simplifiées	Points forts potentiels des techniques d'implantation très simplifiées
		Résidus au semis	Qualité de levée	Compensation	Infiltration hivernale	Enracinement			
Blé tendre d'hiver	Blé pailles restituées	++	++	+++	++	+++	++	Paille, sanitaire, sols humides	Sols moins motteux
	Maïs grain irrigué	+	++	+++	++	+++	++(+)	Répartition résidus, sols humides	Sols moins motteux
Blé dur d'hiver	Autres précédents	++(+)	++(+)	+++	++	+++	+++	Sols humides, conditions de semis selon précédent	Sols moins motteux
Orge d'hiver	Blé pailles restituées	++	++	+++	+	+++	++	Paille, sols humides	Sols moins motteux
	Colza d'hiver	++(+)	++(+)	+++	+	+++	+++	Sols humides	Sols moins motteux
Colza d'hiver	Blé pailles restituées	+	+	+++	+	++	++	Paille, compaction, limaces, campagnols	Sols moins motteux, humidité du sol préservée
	Pois de printemps ou d'hiver	+++	+++	+++	+	++	+++	Compaction, limaces	Sols moins motteux, humidité du sol préservée
Orge de printemps	Blé pailles restituées	++	++	++	++	++	++	Paille (levée), ressuyage du sol en surface	
Pois de printemps	Blé pailles restituées	++	++	+	++	+	+	Levée, ressuyage du sol en surface, enracinement	
Betteraves sucrières	Blé pailles restituées	++	+(+)	+	+++	+	++	Enracinement, ressuyage du sol en surface, levée en semis direct	
Sorgho	Blé pailles restituées	++	+	+	+++	++	++	Levée, limaces	
Maïs grain Maïs fourrage	Blé pailles restituées	++	+++	+	+++	+	++(+)	Structure du sol si élevage	
	Maïs grain	+	++	+	+++	+	++	Résidus, structure du sol	
Soja	Blé pailles restituées	++	++	++	+++	++	++(+)		
Tournesol	Blé pailles restituées	++	+	+	+++	+	+	Levée, limaces, enracinement	

Résidus: de + (beaucoup de résidus) à +++ (peu de résidus)

Qualité de levée: de + (fortes pertes à la levée fréquentes) à +++ (pertes souvent limitées)

Compensation levée: de + (faible compensation) à +++ (forte compensation de pertes à la levée)

Infiltration hivernale: de + (sensible à l'excès d'eau, aux mauvaises structures en sol humide) à +++ (peu sensible)

Enracinement: de + (sensible par les structures compactes) à +++ (plutôt tolérant en sol sain)

Rendement: de + (pertes de rendement fréquentes) à +++ (pertes plutôt rares)

Encadré 2.1

La période de transition : mythe ou réalité ?

De nombreux auteurs décrivent des chutes de rendement suite à une réduction de la profondeur du travail du sol, voire sa suppression, pendant quelques années. Après cette période de « transition » qui peut durer environ 3-4 années, les rendements retrouveraient un niveau comparable aux techniques traditionnelles. Ce phénomène est souvent avancé pour expliquer des chutes de productivité suite à un changement de technique d'implantation (Soane *et al.*, 2012 ; Christian et Ball, 1994).

Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. D'abord, la maîtrise technique des nouvelles techniques d'implantation qui se met en place progressivement : itinéraires, matériels... (Brun *et al.*, 2013 ; Labreuche, 2013). Ce facteur humain est souvent avancé pour expliquer des échecs et est même affiché comme un frein majeur à l'évolution des pratiques agricoles dans le domaine du travail du sol (Derpsch, 1998). Sur un plan agronomique, la création de la porosité par les outils est réduite suite à la suppression du travail profond, et durant les premières années, l'équilibre structural peut être mis à mal car le sol n'a pas encore eu le temps de concentrer plus de matière organique en surface ou de présenter une activité biologique plus élevée. Il faut attendre quelques années pour obtenir un sol moins sensible à la compaction ou présentant une meilleure stabilité structurale en surface. Cela peut impacter temporairement la qualité du lit de semences, la capacité des cultures à s'enraciner, la capacité d'infiltration en eau du sol, la minéralisation des matières organiques, voire le réchauffement du sol.

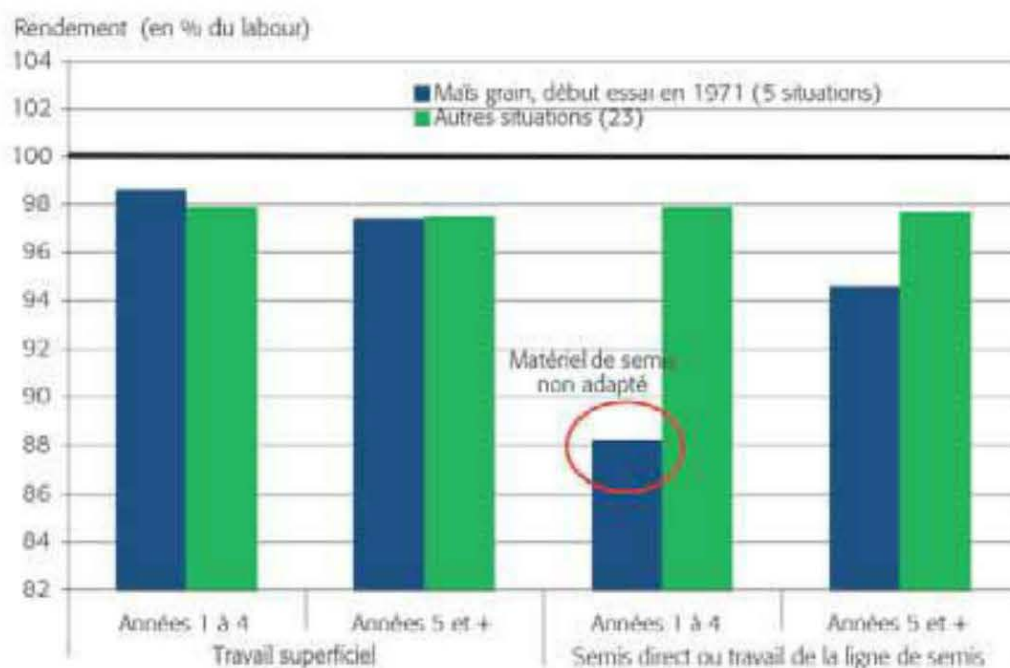


Figure 2.8 : Effet de la durée depuis la suppression du labour sur le rendement en non-labour par rapport au labour. Synthèse de 28 situations (lieux*cultures). Sols diversifiés (limons argileux, limons battants humides, limons sains, gravier...) sur blé et maïs. Première année des essais de 1971 à 2003.

Afin de vérifier si cette baisse relative de productivité est si fréquente après la suppression du retournement du sol, une synthèse de 28 essais a été réalisée (figure 2.8). Il s'agit d'essais de longue durée ayant été en place au moins 8 années. Leur rendement, relatif à celui du labour, a pu être analysé sur 2 périodes : de la première à la quatrième année après la suppression du labour, de la cinquième année à la dernière récolte. Certains essais ont révélé des difficultés rencontrées les premières années à cause de matériels inadaptés. Il s'agit en particulier des situations où du maïs était implanté au début des années 1970. Les matériels, peu adaptés pour les récoltes de 1971 à 1974, ont été progressivement améliorés. La cause des échecs était clairement identifiée (Labreuche, 2013). Nous avons donc séparé ces 5 essais des 23 autres situations (figure 2.8). Pour ces dernières, il ne ressort pas de différence notable entre les 4 premières années et les suivantes, que ce soit en travail superficiel du sol ou en semis direct ou travail réduit à la ligne de semis. On peut cependant noter que la tendance moyenne se situe à 2-3 % de perte de rendement par rapport au labour. Cette moyenne cache des disparités avec des situations moins favorables (cultures, sols, précédents...) qui ont été évoquées précédemment dans ce chapitre. Cette synthèse montre que même si certaines caractéristiques du sol évoluent avec le temps, les premières années de conduite sans labour ne sont pas nécessairement synonymes de chute de productivité et que des limites techniques subsistent même après plusieurs années de réduction du travail du sol. En pratique, il semble préférable de faire évoluer progressivement ses pratiques afin d'en acquérir la technicité nécessaire.

Références bibliographiques

- Boiffin J., Sebillotte M., Couvreur F., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs. In *Simplification du travail du sol en production céréalière. Colloque ITCF, Décembre 1976, Paris*, pp. 239-280.
- Brun D., Ray T., Légère R., Authier A., 2013. Strip-till : Une technique efficace sur maïs si elle est bien positionnée. *Perspectives Agricoles*. N° 399, pp 12-16.
- Caneill J., Bodet J.M., 1994. Simplification du travail du sol et rendement des cultures. In *Simplification du travail du sol. Colloque INRA-ITCF-CEMAGREF, Mai 1991, Paris*, pp. 63-82.
- Christian D.G., Ball B.C. (1994). Reduced cultivations and direct drilling for cereals in Great Britain. *Conservation Tillage in Temperate Agro-ecosystems (ed M.R. Carter)*, pp. 117-140. *Lewis Publishers, Raton, Florida, USA*.
- Dalleine E., 1980. Les façons en travail du sol. *Les études du CNEEMA n° 428, 438, 445, 455 et 463*.
- Derpsch R., 1998. Historical review of no-tillage cultivation of crops, *Proceedings, The 1st JIRCAS Seminar on Soybean Research. No-tillage Cultivation and Future Research Needs, March 5-6, 1998, Iguassu Falls, Brazil, JIRCAS Working Report No. 13, p 1-18, 1998*.
- Henin S., 1955. Profondeur du labour et rendement. *C. R. Acad. Agr., séance du 23 novembre*.
- Henin S., Gras R., Monnier G., 1969. Le profil cultural : l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. *Masson*. 332 p.
- Labreuche J., Closset M., 2012. Crop yields after 41 years of no tillage and minimum tillage farming in a wheat-corn cropping system in France. *19th Triennial ISTRO Conference, September 2012, Montevideo, Uruguay*.

- Labreuche J., 2013. Essai travail du sol de Boigneville: un rotation maïs-blé propice au travail du sol réduit. *Perspectives Agricoles*. N° 401. pp 44-48.
- Leclech N., 2012. 6 ans d'essais en Lorraine: Le semis direct sous couvert performant à condition d'adapter les pratiques. *Perspectives Agricoles*, 390, 22-28.
- Longueval C., Costes J.L., Mamarot J., Lecomte V., Huntz B., Milou C., 2006. Travail du sol sans labour: bilan des suivis 2001-2004 en Midi Pyrénées, synthèse technique. *Rapport Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées*, 24 p.
- Longueval C., Hypolite S., Abella M., Alletto L., Blazian M.J., Doublet S., Eschenbrenner G., Huntz B., Lecomte V., Rodriguez A., 2013. Conditions de mise en œuvre de l'agriculture de conservation dans les exploitations de grandes cultures du Sud-Ouest. *Innovations agronomiques*, 30, 139-159.
- Martin M., Daouze J.P., Derancourt F., Poutrain B., 2004. Le non-labour convient aux pommes de terre. *Perspectives Agricoles*, 300, 39-51
- Richard G., Boiffin J., 1991. Effets de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. In « La structure du sol et son évolution. Conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur », J. Boiffin et A. Marin-Laflèche (eds). *Les colloques de l'INRA N° 53*, INRA, Paris, 1990.
- Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J., 2012. No till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87.
- Stengel P., Douglas J.T., Goss M.J., Monnier G., Canneil R.Q., 1984. Factors influencing the variations of some properties of soil in relation to their suitability for direct drilling. *Soil Tillage Research*.

Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol

H. BOIZARD, C. CHENU, J. LABREUCHE et J. ROGER-ESTRADE

La structure du sol se définit classiquement par « la disposition spatiale des particules constitutives du sol ainsi que la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre elles » (Stengel, 1990). Il n'y a pas de méthode de mesure simple de la structure : elle peut être étudiée soit directement par l'analyse de la porosité ou de la morphologie, soit indirectement à partir de propriétés influencées par la structure du sol comme la résistance à la pénétration ou la conductivité hydraulique. Parmi l'ensemble des critères, la porosité est un élément essentiel pour évaluer la structure. Au niveau opérationnel, les agronomes distinguent la porosité texturale, liée à l'organisation des composants élémentaires du sol (argile, limons, sables, ciments) et la porosité structurale qui découle de la structure et varie au cours du temps avec elle (Monnier *et al.*, 1973).

La structure du sol évolue sous l'effet de plusieurs types de processus, que l'on peut classer en trois groupes (figure 3.1) : les processus abiotiques, comme la fissuration sous l'effet des alternances gel-dégel ou humectation-dessiccation ; les processus biotiques, découlant des micro-organismes, des lombriciens ou des racines sur l'agrégation et la porosité et enfin ceux liés à l'activité agricole, qui sont la fragmentation par le travail du sol et le tassement par les engins agricoles. Le comportement du sol dépend de propriétés qui sont déterminées par sa composition : texture, pH, teneur en matières organiques ou en calcium et par son état au moment où il est sollicité (par exemple, teneur en eau lors d'un passage de roue, humidité de la couche de surface qui détermine la sensibilité à la battance,...).

Outre la complexité des interactions entre les paramètres mentionnés ci-dessus, la principale difficulté que présente l'étude de la dynamique de la structure tient à sa variabilité spatiale, qui s'observe non seulement avec la profondeur, en fonction des horizons résultant du travail du sol, mais aussi latéralement, au sein de la parcelle. Cette variabilité latérale est essentiellement causée par le roulage des engins qui tassent le sol au droit des passages de roues.

La question de la dynamique de la structure du sol ne peut être traitée de façon exhaustive en un chapitre. Aussi, nous avons choisi de passer en revue l'état des connaissances sur la dynamique de la structure en privilégiant les éléments rela-

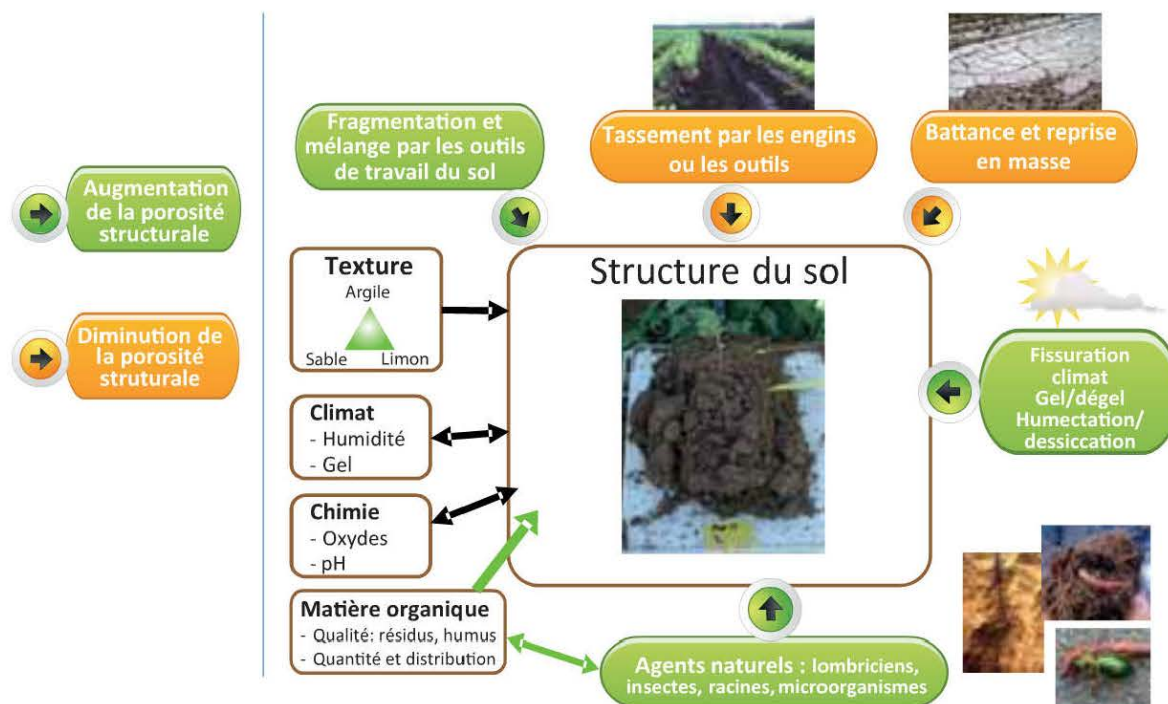


Figure 3.1 : Schéma des facteurs abiotiques, biotiques et agricoles influençant la dynamique de la structure du sol (H. Meiss et H. Boizard).

tifs au système de culture et au travail du sol. Ce chapitre est ainsi constitué de quatre parties : la dynamique de la structure en non-travail hors tassement, l'effet des tassements sur la structure du sol, la régénération des sols tassés par les agents naturels et la régénération de la structure des sols par le travail du sol.

La dynamique de la structure en l'absence de travail du sol et de tassement

En l'absence de fragmentation par le travail du sol, la porosité structurale peut se maintenir grâce à l'action de plusieurs facteurs : fissuration sous l'effet du climat, action des racines, activité biologique et processus d'agrégation. La formation des agrégats peut dépendre de forces physiques (par exemple le retrait lors de la dessiccation d'un matériau) et/ou de l'activité biologique. La stabilité de ces agrégats, ie la stabilité structurale, est définie comme leur capacité à résister à la dégradation sous l'action de l'eau. Cette propriété du sol est indicatrice de sa sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique. Elle est mesurée par différents tests de laboratoire standardisés (Le Bissonnais, 1996 ; AFNOR, 205 ; ISO, 2010).

Beaucoup de travaux ont porté sur la notion de la stabilité structurale et sur les mécanismes qui la régissent. Elle dépend de la proportion et de la nature des ciments minéraux (argile, oxydes, calcium...) présents dans le sol, de la teneur en matières organiques hydrophobes ou agrégeantes et de l'activité des bactéries et hyphes de champignons (figure 3.2). L'apport de matières organiques fraîches au sol favorise l'abondance de ces organismes vivants, micro-organismes et faune du sol et stimule leur activité. Les effets peuvent être de deux types :

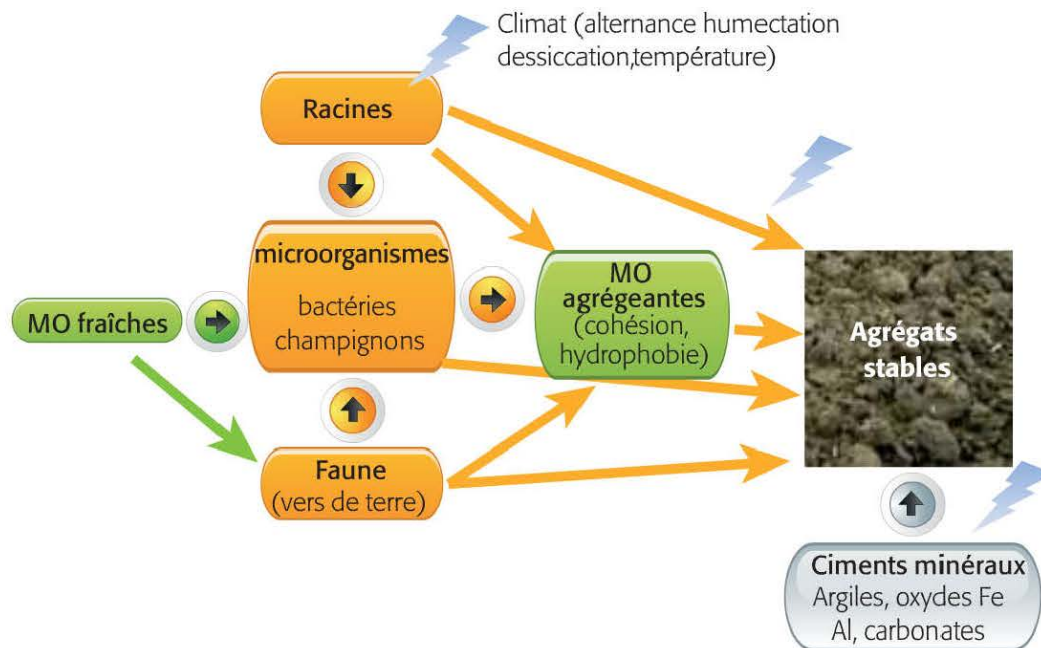


Figure 3.2 : Agrégation et stabilité de la structure : des processus étudiés et connus (Chenu & Cosentino 2011). Les racines, champignons et vers de terre ont un effet mécanique direct sur les agrégats. Ces organismes et les bactéries agissent aussi en sécrétant des composés organiques qui sont des ciments et augmentent la cohésion entre particules ou sont des molécules hydrophobes qui rendent les agrégats moins mouillables et sensibles à l'action de l'eau. L'apport de matières organiques (MO) fraîche stimule l'activité des micro-organismes et de la faune. Le climat, symbolisé ici par un éclair, module l'abondance de ces organismes, leur action agrégeante et celle des ciments minéraux

- en agissant directement sur la stabilité structurale : c'est l'action de rétention mécanique exercée par les racines et par les hyphes de champignon ou la formation de déjections par les vers de terre ;
- en agissant indirectement sur les racines, bactéries, champignons, vers de terre secrètent des ciments organiques, ou des matières organiques partiellement hydrophobes.

L'étude de la stabilité structurale en fonction des modalités travail ou non-travail du sol a fait l'objet de nombreuses études. En semis direct ou travail réduit, la matière organique se concentre à la surface du sol, ce qui favorise le développement de microorganismes qui agissent sur la stabilité structurale par les mécanismes décrits ci-dessus (figure 3.2). Les perturbations physiques du sol sont réduites et la présence d'une litière à la surface du sol favorisent les champignons par rapport aux bactéries, les champignons étant plus « efficaces » que les bactéries (Frey *et al.*, 1999). Les lombriciens anéciques et épigés sont aussi plus abondants. De même, les perturbations physiques du sol réduites permettent le développement des liens organo-minéraux, sans qu'ils soient précocement détruits par ces perturbations ou une exposition à la pluie (Balesdent *et al.*, 2000 ; Six *et al.*, 2000). Ceci confère une plus grande cohésion aux édifices structuraux. La mise en place d'une couverture permanente renforce encore cet effet, car l'action des racines s'exerce pendant plus longtemps (Chenu *et al.*, 2011). À l'inverse, en situation régulièrement labourée

le processus d'agrégation est réduit et donc à long terme la stabilité structurale décroît (Bronick et Lal, 2005).

Le travail du sol accroît la porosité à court terme, mais il a été aussi démontré qu'en non-travail, la porosité structurale du sol peut rester élevée. La méta-analyse d'Alvarez & Steinbach (2009), réalisée à partir de 35 études conduites en Argentine, montre que les différences de porosité entre labour et non-travail du sol sont relativement faibles, confirmant le maintien possible d'une structure favorable en non-travail. En Australie, la généralisation du *controlled traffic farming* avec la localisation des passages de roues toujours dans les mêmes chemins, permet le maintien d'une structure du sol très favorable dans les zones ne subissant plus de compactage. En France sur l'essai « Systèmes de culture et Structure du sol » en sol de limon à l'Inra d'Estrées-Mons, la porosité structurale a pu être maintenue en systèmes céréaliers, parce que les tassements sévères ont pu être évités par la mise en œuvre de règles de décision limitant les interventions en conditions humides (Boizard *et al.*, 2013). En revanche, les sols ayant le moins de ciments minéraux comme les sables ou les sables limoneux ont une stabilité structurale faible avec un risque souvent élevé d'effondrement de la structure du sol qui peut diminuer la porosité. Dans la revue de la littérature centrée sur la Grande-Bretagne, Morris *et al.* (2010) soulignent l'effet majeur du type de sol sur le maintien de cette porosité.

L'effet des tassements sur la structure du sol

Le tassement des sols cultivés résulte essentiellement du roulage des engins agricoles (figure 3.3). L'intensité du tassement dépend de leurs caractéristiques, des propriétés mécaniques du sol et de son état hydrique et structural au moment du passage. Le tassement produit une ornière en surface et, lorsqu'il est sévère,

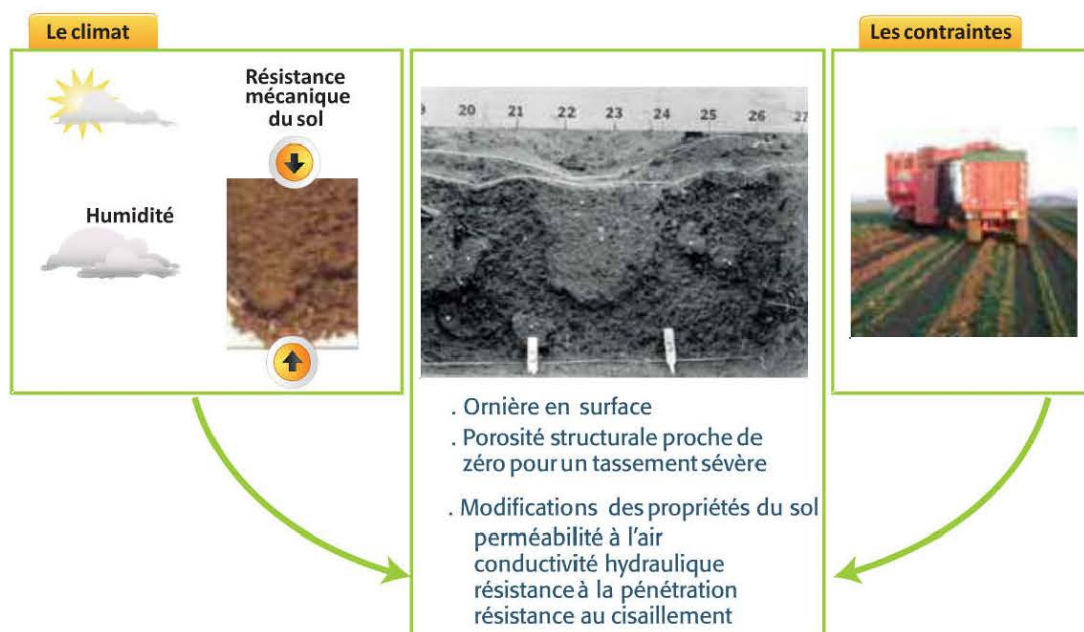


Figure 3.3 : Le tassement et ses effets sur les propriétés du sol - d'après Pauline Défossez

Rendement tassé en % du non tassé

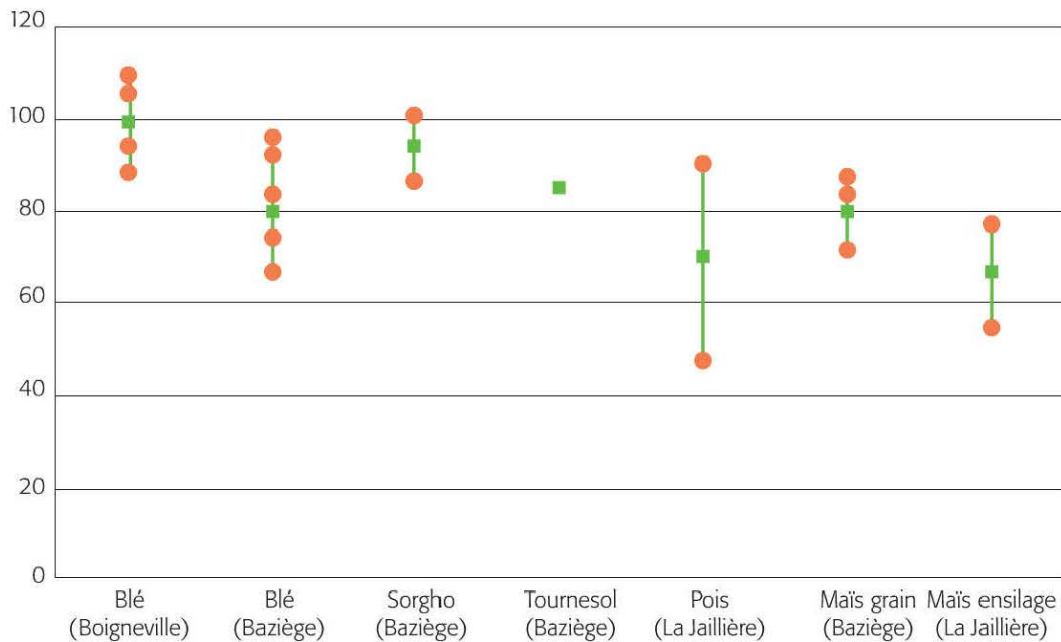


Figure 3.4 : Impact du tassement du sol sur le rendement de différentes cultures en moyenne (■) et en situation individuelle (●). Essais Arvalis -Institut du végétal réalisés à Boigneville (91) en limon argileux, à la Jaillière (44) dans un limon sur schiste et à Montesquieu Lauragais (31) en sol argileux.

conduit à une porosité structurale proche de zéro. Il modifie les propriétés du sol : perméabilité à l'air, conductivité hydraulique, résistance à la pénétration et résistance au cisaillement. Il perturbe aussi la croissance et le fonctionnement des racines et donc l'alimentation en eau et en éléments minéraux des plantes. Enfin il modifie le fonctionnement biologique du sol et la circulation des fluides. Pour toutes ces raisons, les tassements peuvent avoir des impacts importants sur le rendement, qui peuvent être illustrés par la figure 3.4. L'impact n'est pas systématique et dépend des types de cultures et des conditions pédoclimatiques. En raison de leurs caractéristiques spécifiques, les différentes cultures n'ont pas les mêmes réactions : la taille de la coiffe des racines, la période d'enracinement, la longueur et le positionnement du cycle cultural jouent en effet sur la réaction des plantes aux états dégradés du sol. La capacité à s'enraciner dépend aussi de l'humidité du sol en interaction avec la structure de celui-ci au moment de la croissance des racines (Gubiani *et al.*, 2010).

Les modèles de prévision des contraintes appliquées au sol et des déformations qui en résultent sont de plus en plus opérationnels. Nous citerons en particulier Terranimo®, outil web développé dans le cadre d'un projet européen porté par une équipe de scientifiques suisses, suédois et danois, qui permet d'évaluer les contraintes subies par les sols. Le modèle calcule les contraintes en fonction des chantiers (charges, type de pneumatique, pression de gonflage...) et des caractéristiques des sols (texture, humidité...). Les simulations réalisées avec cet outil montrent clairement l'intérêt des pneumatiques larges pour une même charge de 5 t : les contraintes en surface sont réduites (figure 3.5). Par contre, en faisant varier la charge avec le même pneumatique large, les contraintes sont beaucoup

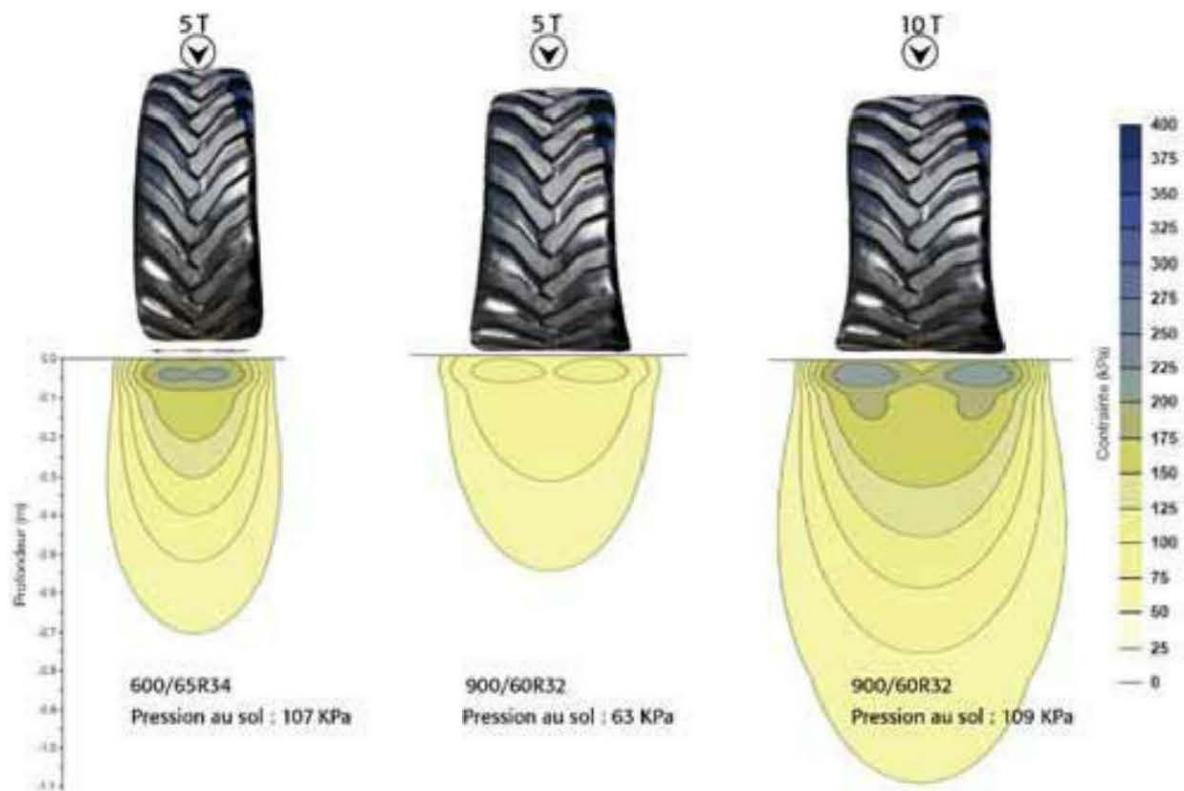


Figure 3.5 : Simulations de l'effet des pneumatiques et des charges par Terranimo®, outil développé par Matthieu Lamandé et Thomas Keller ; simulations réalisées par Vincent Tomis, Agro-Transfert

plus élevées en profondeur. Les travaux expérimentaux conduits au champ par Lamandé et Schjønning (2011) confirment ces résultats.

Ces résultats ont des conséquences fortes au niveau pratique : les tassements sévères peuvent être évités en limitant les charges par pneumatique, ce qui est le cas des chantiers de préparation et semis avec des charges généralement inférieures à 5 t. Par contre, les chantiers de récolte de plus en plus lourds jusqu'à 10 t par pneumatique sont susceptibles d'induire des tassements profonds en fonction des types de sol et de l'humidité. Ces tassements profonds (entre 30 et 60 cm) sont difficiles à corriger : l'effet du climat et des agents naturels est plus faible qu'en surface et le sous-solage est une opération coûteuse et difficile à réaliser. En conséquence, limiter les charges lourdes est un impératif si on veut préserver la qualité de ces sols, ce qui est à l'inverse de la tendance actuelle avec une augmentation continue des charges depuis 20 ans pour gagner en productivité du travail.

La régénération par les agents naturels des sols tassés

Comparaison de la dynamique de la structure du sol avec et sans travail du sol

L'évolution de la structure du sol suite à des tassements sévères est différente en labour et non-travail. Une illustration peut être donnée à partir des résultats

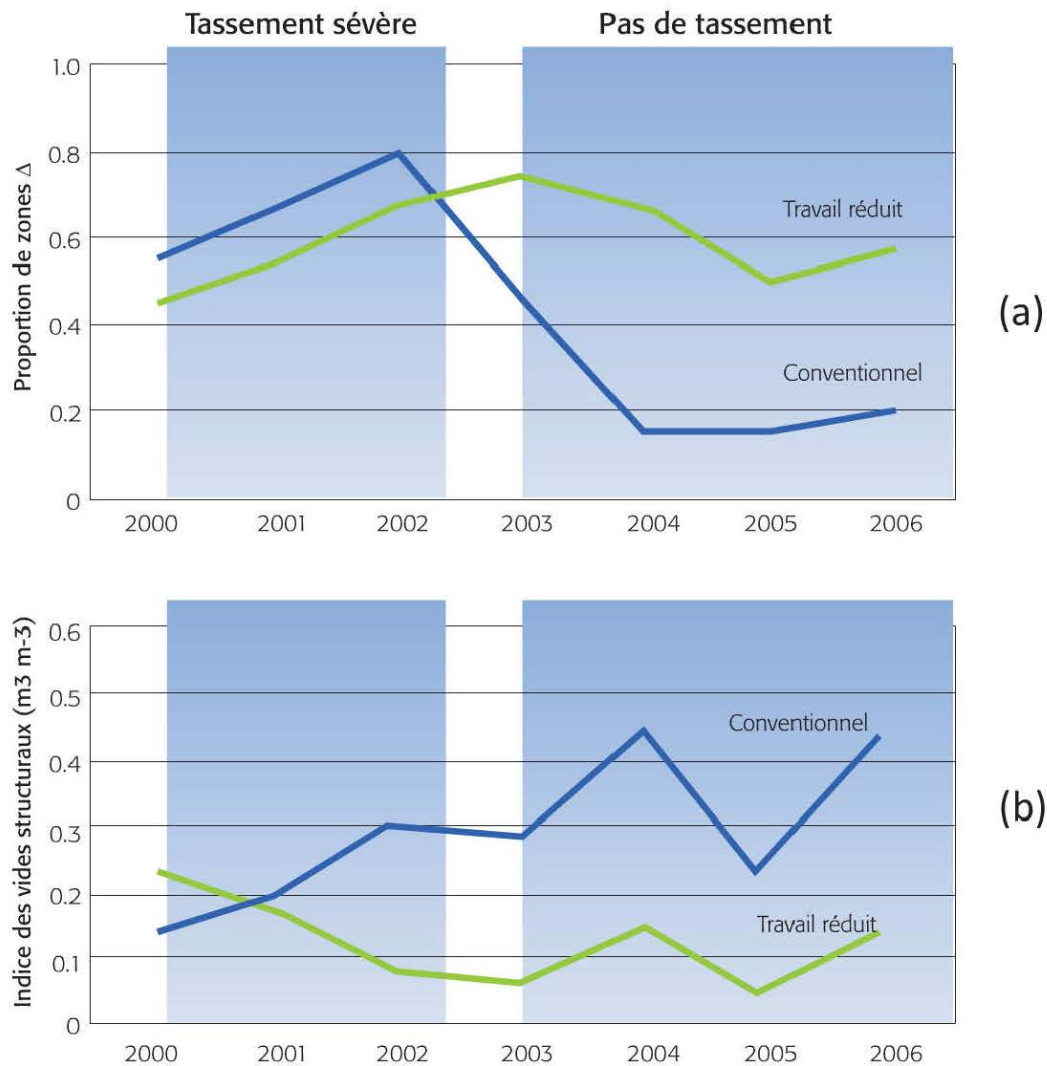


Figure 3.6 : Dynamique comparée de la structure du sol suite à des tassements sévères en travail du sol réduit et conventionnel, exprimée en proportion de zones Δ dans le profil cultural (a) et en indice des vides structuraux (b). L'indice des vides structuraux est le rapport entre le volume des vides structuraux et le volume occupé par les grains solides. Essai «Systèmes de culture et structure du sol» à Estrées-Mons

obtenus sur l'essai « Systèmes de culture et structure du sol » en sol de limon (Inra, Estrées-Mons). Les années 2000 à 2002 correspondent à des années humides avec des tassements sévères : on observe la création de zones à porosité structurale nulle, appelées Δ , de façon similaire en labour et travail réduit. Les années suivantes correspondent à des années sèches sans tassement sévère. En travail conventionnel avec labour annuel, la porosité structurale, exprimée en indice des vides structural, augmente très rapidement sous l'effet de la fragmentation par le labour et la disparition des zones tassées est effective en deux ans sur la profondeur des horizons travaillés (figure 3.6). Par contre, en travail du sol réduit, l'indice des vides structural reste inférieur à 0.10 durant plusieurs années avec persistance des volumes compactés. Cela montre que dans les horizons non travaillés, la régénération des tassements est un processus beaucoup plus lent.

Ce temps long de régénération en non-travail a été observé dans plusieurs situations, pourtant *a priori* favorables à la régénération étant donné le sol et le climat. Il a été évalué à 5 ans sous un vertisol en non-travail du sol dans un climat subtropical semi-aride (Radford *et al.*, 2007). Berisso *et al.* (2013) ont aussi observé la persistance des tassements profonds, 30 ans après le dernier tassement, sur des sols argileux en Finlande.

Cependant l'activité biologique et le climat vont faire évoluer la structure du sol en créant localement des macropores et des fissures. Cette porosité, souvent verticale et continue et même si elle est locale, joue un rôle important sur le fonctionnement du sol et la dynamique d'enracinement.

Effet de l'activité lombricienne dans la régénération de la porosité

Alors que beaucoup de travaux se sont intéressés à l'effet des modalités de travail du sol sur l'activité biologique, peu ont cherché à comprendre l'effet de l'activité biologique sur la dynamique de l'état structural. Parmi les agents biologiques, les lombriciens ont un rôle essentiel. Des résultats récents montrent que leur effet dépend beaucoup de l'espèce considérée avec des comportements très différents entre anéciques et endogées (Capowiez *et al.* 2009). Les anéciques creusent des galeries verticales qui peuvent être profondes, ce qui leur donne la capacité de traverser des semelles de labour, alors que les endogées limitent leur action aux horizons plus superficiels. Par contre, en système labouré avec la présence de blocs compactés et de structure particulière, les différents groupes ont tendance à contourner les volumes tassés.

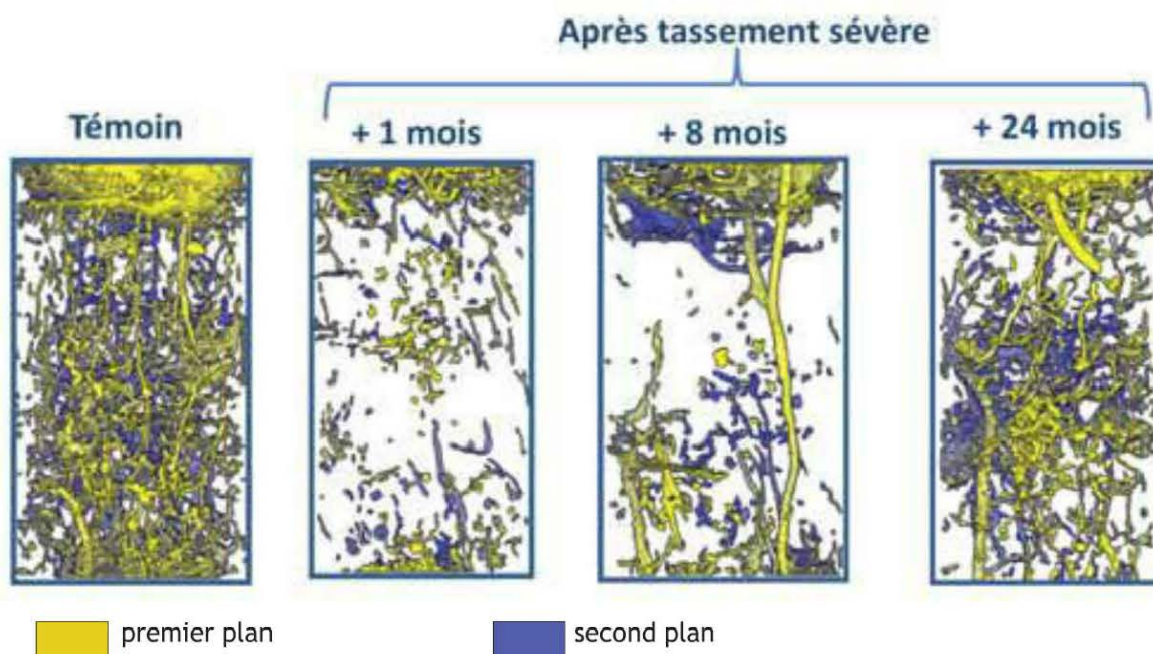


Figure 3.7 : Effet du tassement et de l'activité lombricienne sur la dynamique de la structure du sol observée à partir d'une reconstitution 3D après radio-tomographie des galeries de vers de terre. Des carottes de sol (Ø 16 cm, hauteur : 40 cm) ont été échantillonnées sous des passages de roues et entre les passages 1, 8 et 24 mois après le tassement. (Capowiez *et al.*, 2012).

L'effet du tassement sur les réseaux de galeries et leur reconstitution dans le temps sous l'action des lombriciens a été étudié expérimentalement au champ par Capowiez *et al.* (2012). Sur une parcelle en travail superficiel (< 6 cm) depuis 1999, le passage d'un tracteur chargé en conditions humides au printemps 2005 a conduit à une alternance de bandes tassées et non tassées. La figure 3.7 montre :

- qu'un seul passage d'engin lourd a provoqué l'écrasement du réseau de galeries de vers de terre,
- et que la reconstitution du réseau de galeries dans le temps est effective mais lente : 8 mois plus tard quelques macropores verticaux sont observés ; 2 ans plus tard le réseau n'est que partiellement reconstitué.

Dans la même expérimentation, une réduction forte de l'infiltration a été observée suite au tassement, puis un rétablissement rapide 8 mois plus tard (non montré). On peut donc conclure, à partir de cette expérimentation, que l'activité biologique peut être efficace avec une action progressive, rapide pour reconstituer les fonctions d'infiltration, mais lente pour la reconstitution du réseau de galeries (entre 2 et 4 années). Néanmoins la porosité structurale à l'échelle des volumes tassés (supérieurs à 30 cm de diamètre) est restée faible comme montré sur la figure 3.6, les lombriciens ne modifiant la porosité qu'à l'échelle locale des macropores.

De nombreuses questions restent encore posées sur l'effet de l'activité lombricienne. Pour y répondre, les méthodes d'évaluation au champ, mettant en jeu des indicateurs fonctionnels, ne sont pas suffisamment développées. L'approche morphologique avec description des macropores et des déjections des lombriciens semble particulièrement prometteuse (Piron *et al.*, 2012).

Effet du climat

Les conditions climatiques vont aussi influencer l'évolution de la structure du sol en favorisant la fissuration des sols sous l'effet des cycles d'humectation/dessiccation et de gel/dégel. Les mécanismes sont connus : les tensions à la dessiccation, qui dépendent du taux d'argile, conduisent à la création de fissures primaires généralement sous la forme d'éléments hexagonaux. Des ruptures complémentaires peuvent apparaître perpendiculairement au réseau primaire, créant un réseau secondaire voire tertiaire (Baize et van Oort, 2013). L'observation morphologique de la structure du sol permet de caractériser le niveau de fissuration (prismatique ou polyédrique) et de développement de la structure du sol.

Un autre processus a été mis en évidence depuis quelques années avec l'extension du non-travail du sol en sol de limon : le développement d'une structure lamellaire. C'est en particulier le cas dans la Pampa humide d'Argentine en semis direct où son développement s'observe à grande échelle (Alvarez *et al.*, 2009, Sasal *et al.*, 2006). Le développement d'une structure lamellaire a aussi été mis en évidence sur l'essai longue durée « systèmes de culture et structure du sol » d'Estrées-Mons (Boizard *et al.*, 2013). Si dans le dernier cas l'origine de la structure lamellaire est directement liée au tassement et à sa régénération par le climat, les hypothèses sur les sols de la Pampa restent ouvertes entre un tassement lié aux engins agricoles ou un processus de reprise en masse sous l'effet du climat et de

l'acidification de surface. Aussi les conditions de formation de ce type de structure lamellaire restent à préciser.

Effet de l'activité racinaire

L'action des racines doit aussi être prise en compte. Nous avons montré précédemment que l'agrégation avait un impact direct sur la stabilité structurale par l'action de rétention mécanique, mais aussi une action indirecte via la sécrétion des ciments organiques, ou des matières organiques partiellement hydrophobes. Par contre l'effet des racines sur la régénération des volumes est moins clair pour différentes raisons :

- cet effet est difficile à dissocier de l'activité du climat et de l'activité biologique avec des risques de confusion d'effet
- peu d'études s'intéressent spécifiquement à la régénération des zones tassées par les racines.

Le développement des systèmes avec une couverture végétale plus ou moins permanente devrait contribuer à répondre à cette question.

En conclusion, les différents travaux cités sur la régénération des sols tassés en non-travail du sol montrent clairement l'effet de la composante biologique et du climat sur la dynamique de la structure et des propriétés qui en découlent. Néanmoins, les connaissances restent fragmentaires et ne permettent pas de prévoir et de modéliser leurs effets.

La régénération de la structure des sols par le travail du sol

L'effet des outils de travail du sol reste une question importante pour mieux gérer les systèmes de culture en technique simplifiée : action des décompacteurs, effet comparé du décompactage *versus* labour...

Les travaux conduits sur ce thème datent essentiellement des années 1970-2000. Concernant le labour, les connaissances ont été synthétisées dans le modèle SISOL qui simule le déplacement du sol et son inversion lors du labour (Roger-Estrade *et al.*, 2000). L'action des autres outils a été étudiée principalement sous deux aspects :

- leurs effets en termes de volumes fissurés et fragmentés,
- la dépense énergétique liée au passage de ces outils.

Ainsi, les chercheurs se sont beaucoup intéressés à l'effet du type de dent, de la vitesse ou de l'humidité du sol sur l'angle de fissuration (Godwin, 2007). Plusieurs auteurs ont conduit des travaux permettant de :

- modéliser et prévoir l'énergie nécessaire en fonction de différents outils pour une opération de travail du sol,
- prédire l'efficacité de la conversion de l'énergie. Par contre la modélisation de l'effet des outils sur l'état structural est beaucoup moins avancée. Aussi on peut estimer que l'état des connaissances aujourd'hui reste trop fragmentaire pour simuler de façon générique l'état structural du sol et les propriétés physiques et hydriques du sol en fonction des opérations de travail du sol.

Dans ces conditions, l'approche morphologique reste à privilégier par les praticiens. Une illustration de l'action comparée des outils est donnée à partir d'une expérimentation conduite à l'Inra Estrées-Mons. Suite à un tassement provoqué par le passage d'un tracteur chargé en conditions humides, une comparaison entre labour et décompactage a été réalisée le même jour au printemps 2002. Les figures 3.8a et 3.8b montrent l'effet du travail du sol réalisé un mois après le tassement : le labour fragmente l'ensemble du massif en créant des mottes jusqu'à 20 cm de diamètre et de la terre fine et surtout induit une inversion du sol entre la partie haute et basse. Avec le décompacteur, la fragmentation se développe sous la forme d'un triangle en partant de la pointe du décompacteur, la zone située entre les pointes n'étant pas perturbée, ce qui est conforme à la théorie (Godwin, 2007). Par contre, avec un tassement réalisé avant l'hiver et toujours à la même date d'intervention 6 mois après le tassement, on observe une fragmentation beaucoup plus intense sur l'ensemble de l'horizon (figure 3.8c). Ce dernier résultat a des conséquences importantes sur le plan pratique : il montre que l'efficacité de l'outil peut être fortement améliorée en combinant la fragmentation par l'outil et la fissuration sous l'effet des conditions climatiques.

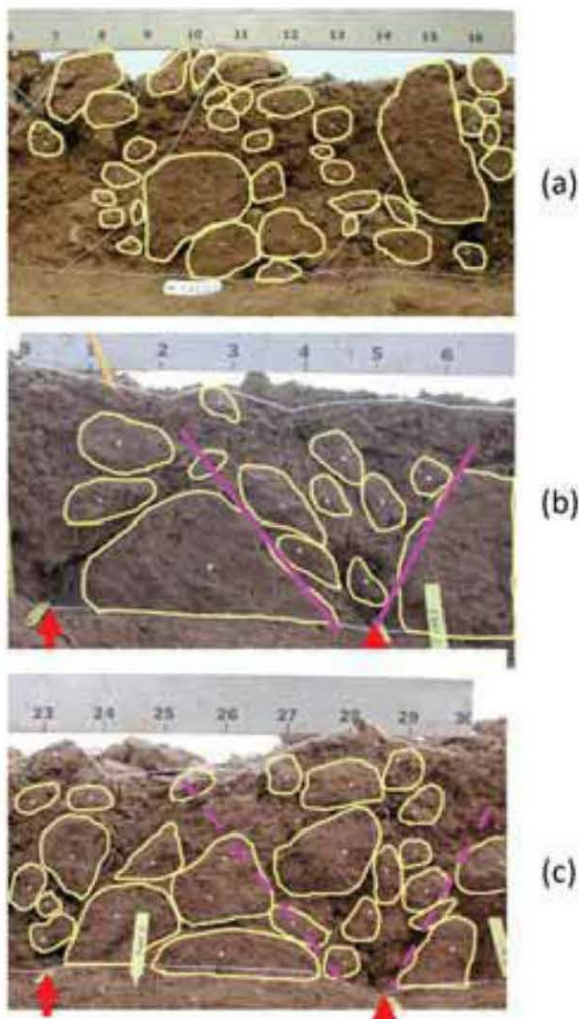


Figure 3.8 : Comparaison de l'effet d'un labour (a) et d'un décompactage (b et c) suite à un tassement sévère créé par le passage d'un tracteur sur un sol de limon. Le tassement a été créé au printemps 2002 a et b) et à l'automne 2001 (c). Les zones délimitées en jaune correspondent aux zones tassées.

Conclusion

Cette revue sur la dynamique de la structure du sol montre que les connaissances actuelles permettent de mieux raisonner les modalités du travail du sol en fonction des systèmes de culture et des pédoclimats, même si des connaissances sont encore manquantes comme l'effet des agents naturels ou l'effet spécifique des racines. Les principaux enseignements de cette revue sont les suivants :

- la porosité structurale du sol peut se maintenir en non-travail sous l'effet de différents processus : fissuration sous l'effet du climat, activité biologique et agrégation. Le rôle favorable du processus d'agrégation pour le maintien de la structure est favorisé en travail réduit par les entrées organiques en surface aussi bien en quantité qu'en qualité. Par contre, les sols ayant le moins de ciments minéraux comme les sables ou les sables limoneux ont une stabilité structurale faible.
- Il est important d'évaluer l'intensité des tassements dans les systèmes de culture, parce qu'ils modifient de façon majeure la dynamique de la structure des sols et leurs propriétés physiques et hydriques. Les travaux récents mettent en avant le risque de tassements profonds peu réversibles, liés à des chantiers de plus en plus lourds.
- La restructuration des sols suite à un tassement est très différente entre travail et non-travail du sol. En système avec travail du sol, la restructuration des sols peut-être rapide sous l'effet principal de la fragmentation par les outils, combiné à l'effet du climat et de l'activité biologique. En non-travail du sol, la restructuration sous l'effet des agents naturels est plus lente et dépend des systèmes de culture et du type de sol : suite à un tassement sévère, la porosité structurale à l'échelle des horizons tassés reste faible de façon durable ; par contre il a été montré que les lombriciens pouvaient recoloniser rapidement les volumes tassés en créant des macropores verticaux et que le réseau de galeries pouvait être partiellement reconstitué après deux années. L'action des racines est importante mais les références manquent en particulier pour les systèmes ayant une couverture plus ou moins permanente.
- Les travaux récents montrent que les macropores dont l'orientation est verticale jouent un rôle très important en non-travail du sol. Il est néanmoins nécessaire de mieux l'évaluer et de le modéliser en termes de développement et continuité des réseaux de macropores ou fissures ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des sols et le comportement des cultures.
- Le diagnostic au champ de l'état structural reste un moyen privilégié pour améliorer la gestion des systèmes de culture et en particulier les pratiques de travail du sol. Mais il faut renouveler nos méthodes d'observation, en particulier adapter la méthode du profil cultural au non-travail du sol, et mieux combiner les méthodes d'observation et les mesures de propriétés.

Références bibliographiques

- Alvarez, R., Steinbach H.S., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*, 104, 1–15.
- Baize, D., Van Oort F., 2013. Structure et porosité Importance pour les fonctionnements des sols Naissance et destruction des agrégats. In : Les sols et leurs structures. Observations à différentes échelles. (D. Baize, O. Duval, G. Richard, eds.), chapitre 2, collection Synthèses, éditions Quae, Versailles, 21–38.
- Berisso F.E., Schjønning P., Keller T., Lamandé M., Simojoki A., Iversen B.V., Alakukku L., Forkman J., 2013. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma*, 195–196, 184–191
- Boizard H., Yoon S.W., Leonard J., Lheureux S., Cousin I., Roger-Estrade J., Richard G., 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil and Tillage Research*, 127, 34–44.
- Bronick, C.J., Lal R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3–22.
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 711–717.
- Capowiez Y., Samartino S., Cadoux S., Bouchant P., Richard G. et Boizard H., 2012. Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 55, 93–103.
- Godwin R.J.J., 2007. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*, 97, 331–340.
- Gubiani P.I., Reichert J.M., Reinert D.J., Gelain N.S., 2010. Soil resistance to penetration under the dynamic and predictive perspective of restriction to crop yield. Proceedings of 19th World Congress of Soil Science, *Soil Solutions for a Changing World* pp. 161–164.
- Lamandé M., Schjønning P., 2011. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil & Tillage Research*, 114, 71–77.
- Monnier G., Stengel P., Fies J.C., 1973. Une méthode de mesure de densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques* 24, 533–545.
- Morris N.L., Miller P.C.H., Orson J.H., Froud-Williams R.J., Orson J.H., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment-A review. *Soil & Tillage Research*, 108, 1–15.
- Piron D., Pérès G., Hallaire V., Cluzeau D., 2012. Morphological description of soil structure patterns produced by earthworm bioturbation at the profile scale. *European Journal of Soil Biology*, 50, 83–90
- Radford B.J., Yule D.F., McGarry D., Playford C., 2007. Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 97, 249–255.

Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Boiffin J., Caneill J., Manichon H., 2000. Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *European Journal of Soil Science*, 51, 455–474.

Sasal M.C., Andriulo A.E., Taboada M.A., 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87, 9–18.

Stengel P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : La structure des sols et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur (J. Boiffin & A. Marin-Laflèche, eds). *Les colloques de l'INRA, Versailles*, 53, 15–36.

Effets du travail du sol sur les cycles biogéochimiques de l'azote et du carbone : compréhension des mécanismes et conséquences pour la gestion des pratiques agricoles

B. MARY, J-P. COHAN, B. DIMASSI, S. RECOUS, F. LAURENT

Les cycles de l'azote et du carbone sont au cœur des enjeux de la durabilité des systèmes de culture en France. En premier lieu, l'azote est, avec l'eau, le premier facteur limitant de la production végétale. Ce rôle primordial combiné à la variabilité du coût des engrais minéraux fait de la maîtrise du cycle de l'azote un des enjeux économiques majeurs de l'agriculture d'aujourd'hui et de demain (Cohan *et al.*, 2011, Laurent et Leveau, 2014). De plus, les cycles de l'azote et du carbone sont impliqués dans de nombreux transferts de composés azotés réactifs¹ dans l'environnement : nitrate dans l'hydrosphère, ammoniac, protoxyde d'azote et oxyde d'azote dans l'atmosphère (Sutton *et al.*, 2011). Les émissions de protoxyde d'azote fortement contributrices du bilan gaz à effet de serre des filières de productions (CITEPA, 2013) peuvent, dans certaines situations, être contrebalancées par le stockage de carbone dans les sols agricoles. Enfin, s'intéresser au carbone dans le sol renvoie à la fonction centrale de la matière organique du sol, en interaction avec la fertilité biologique motrice des cycles biogéochimiques, avec la fertilité chimique déterminant la disponibilité des éléments minéraux utiles aux végétaux mais facilitant des transferts hors de la parcelle agricole, et avec la fertilité physique renvoyant aux conditions d'accès à ces éléments minéraux et à l'eau.

Pour toutes ces raisons, il est donc primordial de déterminer l'effet des pratiques culturales sur les cycles du carbone et de l'azote afin d'évaluer leurs conséquences,

1. Au sens d'«azote réactif» : toute forme d'azote présente dans l'atmosphère, le sol, les eaux et qui est active d'un point de vue biologique, photochimique et radiatif (Galloway *et al.*, 2003).

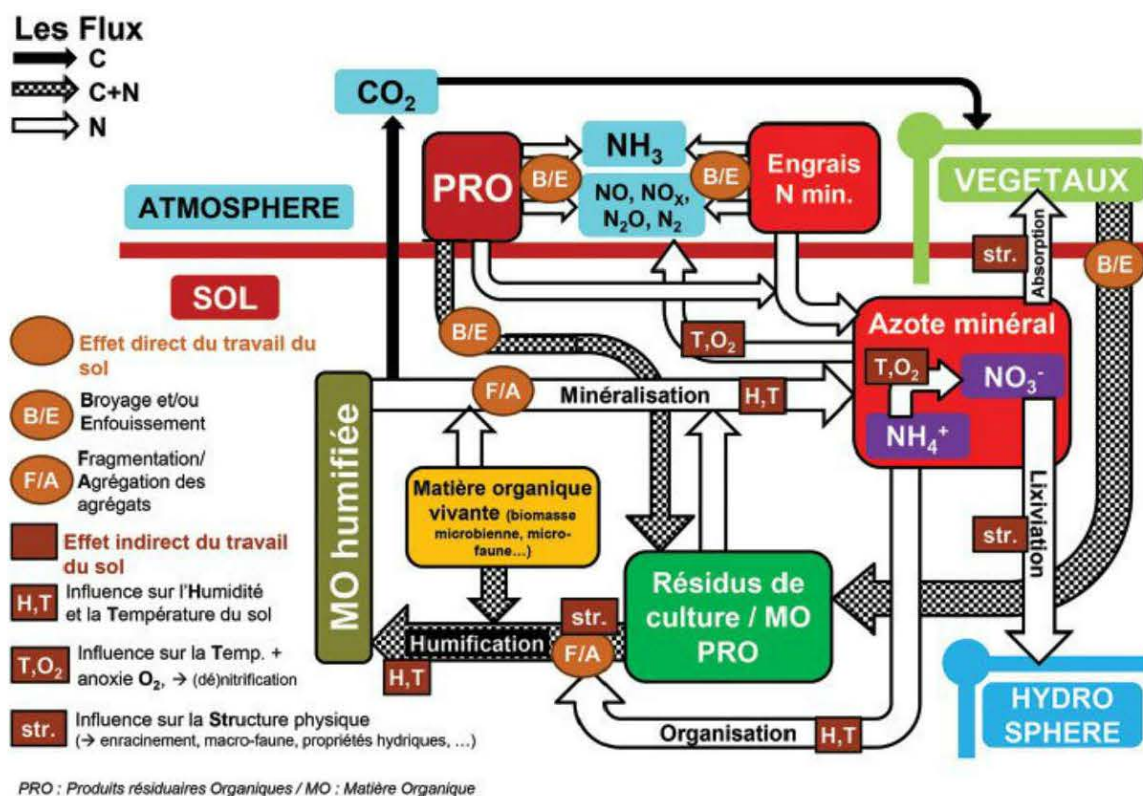


Figure 4.1 : Cycles du carbone et de l'azote dans une parcelle agricole et leur modification sous l'effet du travail du sol.

qu'elles soient choisies pour des raisons agronomiques ou d'autres raisons (réduction de charges de mécanisation par exemple), et pour éventuellement orienter leurs modalités de mise en œuvre afin d'optimiser leur contribution aux services écosystémiques recherchés. Parmi les pratiques à évaluer, le travail du sol jouit d'un statut particulier, car son influence se fait ressentir à de nombreux niveaux (figure 4.1). On peut distinguer deux types d'effet :

- des effets directs qui consistent en une action physique sur des constituants du sol ou des végétaux (agrégats, résidus végétaux...) ;
- des effets indirects qui sont des conséquences du travail du sol sur des propriétés ou caractéristiques du sol pouvant influencer de nombreux processus (température et humidité des couches de sol travaillées ou non, conditions d'aération, structure physique).

Étant donné la complexité et l'imbrication étroite de ces processus, les résultats qui sont présentés dans ce chapitre s'attachent à évaluer l'impact de différentes modalités du travail sur les principaux flux d'azote et/ou de carbone, et à avancer des hypothèses d'explication sous-jacentes pour en déduire des préconisations opérationnelles. Nous répondrons successivement à trois questions concernant la réduction de l'intensité du travail du sol :

- 1) modifie-t-elle la disponibilité d'azote minéral pour les cultures et pour les processus de transferts d'azote réactif dans l'environnement ?
- 2) a-t-elle un effet sur la dynamique de stockage du carbone dans le sol ?
- 3) a-t-elle un impact sur le bilan gaz à effet de serre d'une parcelle agricole ?

Enfin, signalons que la mise en œuvre des techniques culturales simplifiées s'accompagne souvent d'une plus grande fréquence d'implantation de couverts dans la rotation. Les résultats présentés s'attachent à découpler ces deux techniques en évaluant uniquement les effets de différentes modalités de travail du sol, « toutes choses égales par ailleurs », mais aussi, quand cela est possible, à replacer cet effet par rapport à celui d'autres pratiques. C'est le cas en particulier des restitutions de biomasse par les végétaux (couverts ou cultures principales) qui impactent fortement les cycles de l'azote et du carbone.

Travail du sol et flux d'azote

Minéralisation nette de l'azote organique

Minéralisation de l'azote organique humifié

L'éventualité d'un effet de la réduction du travail du sol sur la minéralisation de l'azote organique humifié est une question souvent posée par les praticiens et repose sur plusieurs hypothèses. Premièrement, à l'image du carbone organique (voir chapitre 4), l'abandon du labour entraîne la formation d'un gradient vertical de teneur en azote organique, avec une plus forte concentration dans l'horizon de surface. Bien que le stock total d'azote organique soit peu ou pas modifié sur le long terme (Constantin *et al.*, 2010, Dimassi *et al.*, 2013), il est logique de s'interroger sur les conséquences de cette nouvelle répartition de la matière organique sur la dynamique de minéralisation de l'azote de l'humus. Deuxièmement, la réduction du travail du sol peut s'accompagner de la formation de macro-agrégats conférant une protection physique à la matière organique (Balesdent *et al.*, 2000, Oorts *et al.*, 2007b). Cette protection est susceptible de diminuer la vitesse de minéralisation de l'azote organique. Enfin, quelle que soit la source d'azote organique (humus, résidus de culture, produits résiduels organiques...), le processus de minéralisation est tributaire de l'activité biologique du sol, elle-même fortement dépendante des conditions d'humidité et de température. En modifiant ces deux facteurs et l'exposition de la matière organique à ces derniers, la réduction du travail du sol pourrait indirectement affecter les quantités d'azote fournies par minéralisation. Afin de pouvoir conclure, il est nécessaire de confronter ces hypothèses aux résultats expérimentaux disponibles comparant les quantités d'azote minéralisé au champ selon différents modes de travail du sol.

À l'occasion d'une synthèse de la bibliographie internationale, Le Souder *et al.* ont rassemblé en 2007 plusieurs comparaisons réalisées sur de courtes périodes temporelles, dans des dispositifs qui avaient différencié les pratiques de travail du sol depuis relativement peu de temps (figure 4.2a). Trois dispositifs sur 7 mettent en évidence une moindre quantité d'azote minéralisée en cas de réduction du travail du sol. Ces résultats montrent une réduction moyenne de 12 kg N/ha (sur la période de mesure) des quantités d'azote minéralisé quand on passe en semis direct. Cependant, cet écart statistiquement significatif est surtout dû à un essai qui pose question car il affiche la plus grande différence de minéralisation

(37 kg N/ha) alors qu'il a la plus faible durée de suivi (26 à 39 jours). En fait, l'effet travail du sol doit être analysé sur des suivis de plus longue durée et après une plus longue période de différenciation des systèmes. De plus, il est souhaitable d'analyser les résultats d'azote minéralisé en utilisant l'équation suivante (Mary *et al.* 1999, Comifer 2013) :

$$[1] \quad Mh = Vp \times JN$$

avec : Mh = quantité d'azote minéralisé à partir de la matière organique humifiée (kg N/ha)

Vp = vitesse potentielle de minéralisation pour une température et une humidité du sol de référence (kg N/ha/JN)

JN = nombre de jours normalisés correspondant à la période de calcul

Cette décomposition en deux termes permet de bien séparer l'effet du travail du sol d'une part sur la minéralisation potentielle (Vp), spécifique des populations microbiennes, et d'autre part sur le régime hydrique et thermique du sol qui agit sur l'activité des décomposeurs (JN). Le temps normalisé (JN) est calculé à partir des lois d'action de la température et de l'humidité du sol, relativement à des conditions de référence : température de 15°C et humidité à la capacité au champ. Il correspond à une échelle de temps « biologique » plutôt que calendaire

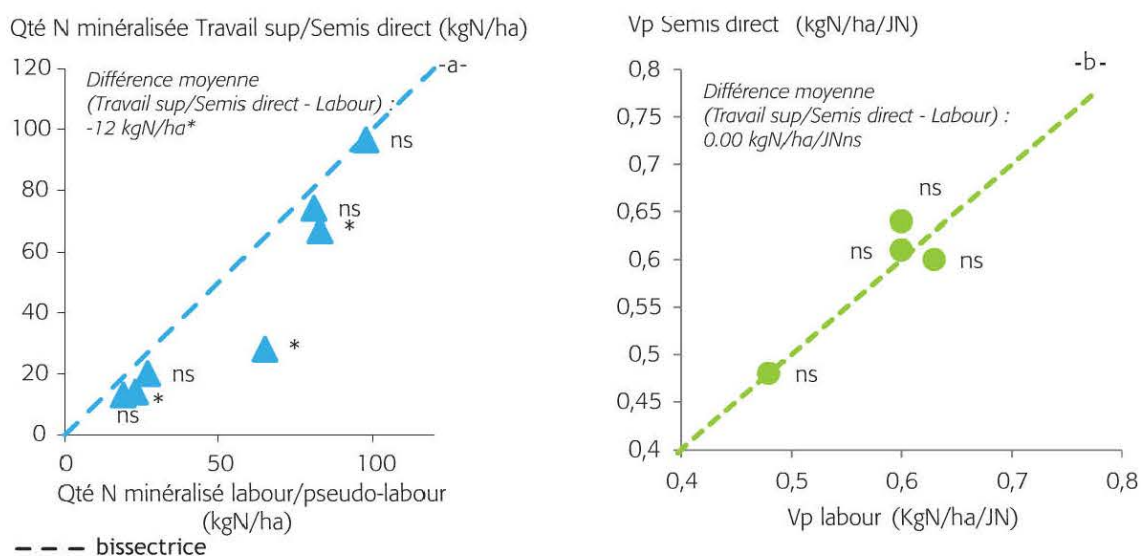


Figure 4.2 : Effet du mode de travail du sol sur la minéralisation de l'azote organique du sol.

a- comparaison des quantités d'azote minéralisé (kg N/ha) mesurées au champ sur de courtes périodes (1 à 6 mois), après différenciation du mode de travail du sol de 1 à 12 ans (Powlson 1990, Hoffman *et al.*, 1996, Dou *et al.*, 1995, Goss *et al.*, 1993, Catt *et al.*, 2000, Stevenson *et al.*, 1998 ; cités dans Le Souder *et al.*, 2007)

b- Comparaison des vitesses potentielles de minéralisation (kg N/ha/JN) mesurées sur de longues périodes (9 mois à 10 ans), après différenciation du mode de travail du sol de 15 à 32 ans (dispositifs expérimentaux Arvalis de Boigneville -91- Oorts *et al.* 2007, et de La Jaillière -44- Gillet 2006 cité dans Le Souder *et al.*, 2007).

*= différence statistiquement significative au seuil de 5 % ; ns=différence statistiquement non significative. Les essais ont été analysés individuellement. Une analyse statistique a aussi porté sur la différence moyenne des résultats (test de Student de comparaison de moyennes appariées).

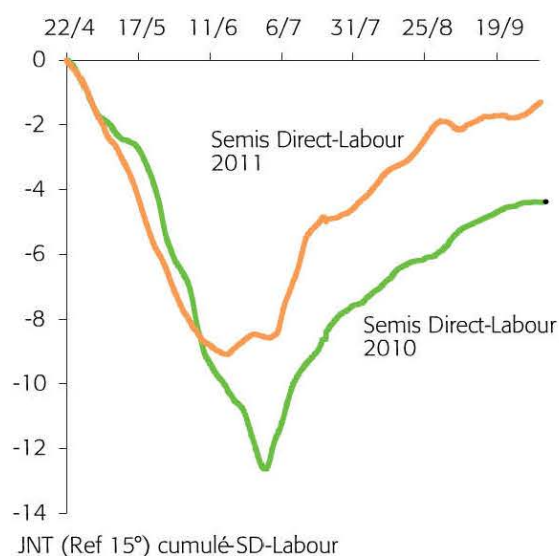


Figure 4.3 : Ecarts cumulés de temps normalisé (JNT, en jours) entre les conduites semis direct et labour, pendant deux cycles de culture du maïs (2010 et 2011).

Le calcul de JNT est basé sur les mesures de température du sol (0-30 cm) réalisés par l'INRA sur l'essai Arvalis « Travail du sol » de Boigneville-91 (40 ans de différenciation des modes de travail du sol). Il tient compte uniquement des différences de température du sol.

en s'affranchissant des conditions locales du climat et permet de comparer des dynamiques de minéralisation observées dans des contextes différents (Mary *et al.*, 1999). Comparer les Vp de différentes situations revient donc à comparer leurs potentiels de minéralisation, indépendamment des conditions climatiques spécifiques d'une année. La figure 4.2b compare les Vp observés en labour et en semis direct sur quatre sites expérimentaux français de longue durée (Oorts *et al.* 2007, Gillet 2006 cité dans Le Souder *et al.* 2007). Il apparaît qu'aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre ces deux régimes de travail du sol.

Si le mode de travail du sol n'impacte pas significativement la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique humifié, il pourrait néanmoins influencer les quantités d'azote minéralisé en modifiant les conditions de température et d'humidité de surface, et donc les jours normalisés. Afin de tester cette hypothèse, nous avons analysé les suivis de température réalisés par l'Inra sous maïs en 2010 et 2011 sur l'essai Arvalis « Travail du sol » de Boigneville (91) afin de calculer l'effet des différences observées sur le calcul des jours normalisés (suivis réalisés jusqu'à 30 cm de profondeur - figure 4.3). On observe la même tendance sur les deux années : un écart négatif de JN en début de cycle en faveur du labour qui indique des conditions plus favorables à la minéralisation, puis une inversion de la tendance au mois de juillet. Les minima de ces cinétiques montrent un écart du nombre de jours normalisés en défaveur du semis direct de -12 JNT² en 2010 et -9 JNT en 2011, pour des écarts cumulés finaux de -4 JNT en 2010 et -1 en 2011. Deux conclusions peuvent être tirées :

- il existe une « saisonnalité » de l'influence du travail du sol sur les conditions de minéralisation,
- les différences constatées sont de faible ampleur. En effet, en considérant une valeur Vp de 0.60 kg N/ha/JN pour ce site d'essai (figure 4.2b), on obtien-

2. JNT = Jour normalisé cumulé calculé uniquement avec la loi d'action température. Il ne représente donc que l'effet du facteur température sur la dynamique de minéralisation de l'azote organique, indépendamment des conditions d'humidité du sol.

draît au maximum une différence de -7 kg N/ha minéralisé jusqu'à la moitié du cycle du maïs. Ces calculs uniquement basés sur les écarts de température pourraient être légèrement modifiés en prenant en compte les écarts d'humidité du sol mesurés conjointement. Il s'avère que ceux-ci sont de faible ampleur et en général en faveur du semis direct, ce qui tendrait à diminuer les écarts de JN calculés.

En conclusion, il s'avère que même si quelques références expérimentales mettent en évidence un effet négatif du semis direct sur la minéralisation de l'azote organique humifié dans les premières années de différenciation, la majorité des résultats disponibles démontre que la réduction du travail du sol n'a peu ou pas d'effet sur ce flux net, aux pas de temps compatibles avec la gestion de la fertilisation azotée des peuplements cultivés.

Minéralisation de l'azote des résidus de culture

Si l'impact d'une réduction du travail sur les conditions d'humidité et de température du sol apparaît mineur, la réduction du travail du sol modifie la localisation des résidus de culture avec un moindre enfouissement des résidus dans le sol, voire l'absence totale d'incorporation dans le cas du semis direct. Quelques références expérimentales existent dans la bibliographie (Darwis 1993 pour un exemple dans un contexte français, figure 4.4), et montrent que la cinétique de minéralisation des résidus peut être significativement ralentie en cas d'absence de mélange des résidus végétaux avec les particules du sol. Des travaux récents (Coppens *et al.*, 2006, Findeling *et al.*, 2007, Coppens *et al.*, 2007) ont mis en évidence que ce phénomène résultait surtout de conditions d'humidité moins favorables à la biodégradation des résidus. Cet effet s'atténue ou disparaît dans des situations avec des pluviométries importantes. Il est aussi en forte interaction avec les caractéristiques physiques des résidus de culture, notamment leur capacité à absorber et retenir l'eau de la pluie (Iqbal *et al.*, 2013). Pour les résidus à rapport C/N élevé, comme des pailles de blé, nécessitant de l'azote minéral dans le sol pour se décomposer (Justes *et al.*, 2009), l'absence d'enfouissement et donc d'accès à l'azote présent dans le sol est un autre facteur explicatif de cinétique de minéralisation ralentie. Le contact entre les résidus et les microorganismes décomposeurs semble être un facteur secondaire, grâce notamment aux capacités de colonisation importante de la microflore du sol. Outre les aspects liés à l'implantation de la culture suivante

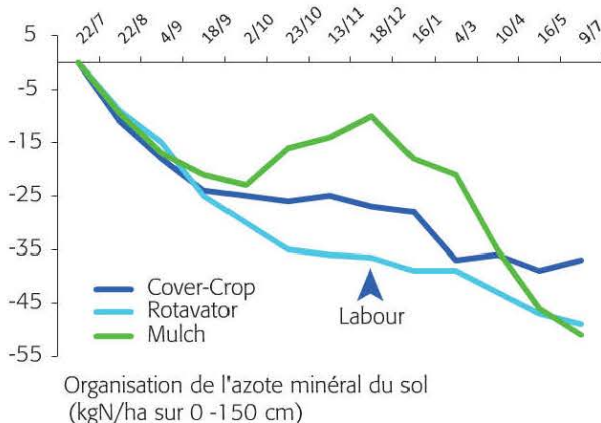


Figure 4.4 : Cinétique d'organisation de l'azote minéral du sol après une restitution de 8 tonnes/ha de pailles, pour 3 modes d'incorporation. La cinétique est calculée à partir des suivis de l'évolution des stocks d'azote minéral du sol. Expérimentation d'Estrées-Mons (80) 1990-1991 (sol de limon), travaux INRA/HYDRO-AGRI (Darwis, 1993).

qui sont traités dans le chapitre 2, un ralentissement de la cinétique de minéralisation des résidus peut avoir des conséquences sur la dynamique de fourniture d'azote à la culture suivante. Cependant, cet effet de décalage du phénomène en situation de travail du sol réduit peut être en partie compensé par une moindre organisation de l'azote minéralisé dans la matière organique du sol, en raison de la localisation des résidus en surface.

Lixiviation du nitrate

Les pertes d'azote nitrique par entraînement vertical dans le sol lors des périodes de drainage sont désignées sous le terme de lixiviation, communément appelé lessivage du nitrate. Au-delà des enjeux agronomiques, il est indispensable de minimiser ce flux car les pertes d'azote par cette voie font l'objet de mesures réglementaires de réduction dans les plans d'actions successifs mis en place dans le cadre de la Directive Nitrates (n° 91/676/CEE du 12/12/91). De nombreux dispositifs expérimentaux fournissent des références concernant l'impact de la réduction du travail du sol sur ce flux (cf. la revue bibliographique internationale disponible dans Le Souder *et al.* 2007, Laurent et Fontaine, 2006, Oorts *et al.*, 2007, Constantin *et al.* 2010 pour des références françaises). Les résultats apparaissent contradictoires et ne permettent pas de dégager une tendance significative en faveur d'un type de travail du sol. Cet état de fait est probablement dû à la complexité des facteurs mis en jeu quand on réduit l'intensité du travail du sol et que l'on laisse d'importantes quantités de résidus végétaux en surface (concentration de l'azote organique en surface, modification éventuelle des schémas de circulation de l'eau, modification de l'humidité de surface...), facteurs en forte interaction avec les conditions de milieu. Il ne faut donc pas considérer la réduction du travail comme un levier d'action majeur vis-à-vis de la maîtrise de la lixiviation du nitrate ; en particulier au regard d'autres leviers qui ont prouvé leur efficacité comme l'implantation de culture intermédiaire piège à nitrate (Laurent et Fontaine, 2006, Constantin *et al.*, 2010, Justes *et al.*, 2012).

Pertes d'azote issues de l'engrais et efficacité d'absorption de l'azote minéral par la plante

A la suite d'un apport d'engrais azoté (minéral ou organique), l'absorption d'azote par la plante est concurrencée par différents processus que l'on regroupe sous le terme de « pertes » incluant les émissions gazeuses dans l'atmosphère (ammoniac NH_3 , oxydes d'azote comme le N_2O , diazote N_2), les transferts de nitrate par lixiviation sous culture (possibles dans certains cas particuliers de cultures de printemps) et l'organisation d'azote minéral par la biomasse microbienne. Ce dernier flux n'est pas une « perte » d'azote hors du système sol, mais c'est une perte pour le compartiment d'azote minéral disponible à court terme pour la culture. Dans la plupart des situations, on peut relier le défaut d'efficacité d'absorption de l'azote de l'engrais par la culture à deux phénomènes majeurs : la volatilisation ammoniacale et l'organisation au sein de la matière organique. Étant donné les modifications d'état du milieu générées par la simplification du travail du sol, notamment

sur l'horizon de surface, il est légitime de s'interroger sur son influence sur ces deux flux d'azote et sur l'efficacité des apports d'engrais azotés.

Volatilisation ammoniacale

Les pertes d'azote gazeux par volatilisation ammoniacale se produisent principalement à la suite des épandages d'engrais minéraux et organiques. Elles sont une des principales causes de baisse d'efficacité technique de ces apports et impactent la qualité de l'air. A ce titre, les émissions sont réglementées via la Directive NEC (n°2001/81/CE 23/10/01). Le phénomène est fortement tributaire des quantités d'ammonium contenues dans les produits azotés épandus, des conditions agro-climatiques au moment des apports et des pratiques agricoles suite à ces apports. En modifiant les conditions de température, d'humidité et de pH dans la couche supérieure du sol, ainsi que la localisation des résidus de culture (sources d'organisation d'azote minéral), la réduction du travail du sol pourrait impacter le phénomène. La multiplicité des facteurs et des conditions (et de leurs interactions) qui président à l'établissement de ces flux gazeux rend difficile la mise en évidence univoque d'un effet du travail du sol. En revanche, si l'abandon de celui-ci s'accompagne de la persistance d'un important volume de résidus végétaux en surface, cela augmente la surface d'échange gazeux entre la solution contenant l'azote de l'engrais et l'atmosphère. Un apport d'engrais, notamment pour les formes liquides, réalisé dans ce type de situations se trouverait dans des conditions plus favorables à la volatilisation ammoniacale que le même apport réalisé sur sol nu (Génermont *et al.*, 2003). Enfin, le levier le plus efficace pour réduire les émissions reste l'enfouissement rapide de l'engrais afin de créer une « barrière physique » aux émissions (Webb *et al.*, 2010, Cohan *et al.*, 2013a). Le passage en semis direct est incompatible avec une telle pratique pour la plupart des produits résiduels organiques solides par exemple, engendrant par là un risque accru de pertes gazeuses.

Organisation de l'azote minéral au sein de la matière organique

La quantité et la nature des matières organiques du sol en cours de décomposition déterminent des besoins en azote pour les microorganismes décomposeurs, nécessaires pour assurer leur croissance. Les besoins microbiens en azote sont assurés *pro parte* par l'azote minéralisé au cours de la décomposition de la source organique elle-même, mais s'ils sont supérieurs on observe alors une diminution nette de la quantité d'azote minéral dans le sol (c'est l'organisation nette), contribuant à la diminution du stock disponible pour la culture. Cette situation correspond notamment à la décomposition de résidus végétaux à rapport C/N élevé, comme des pailles de blé (Justes *et al.*, 2009). En cours de culture, l'azote issu de l'engrais peut aussi être organisé dans la matière organique humifiée, dans une proportion pouvant atteindre 30 % de l'azote apporté (Recous *et al.*, 1988). Les quantités en jeu sont corrélées au taux de matière organique du sol. En l'occurrence, la concentration de la matière organique en surface observée en cas de simplification du travail du sol a souvent été considérée comme à l'origine de la moindre efficacité des apports d'engrais (Ehlers et Claupein, 1994). Les différents travaux étudiant

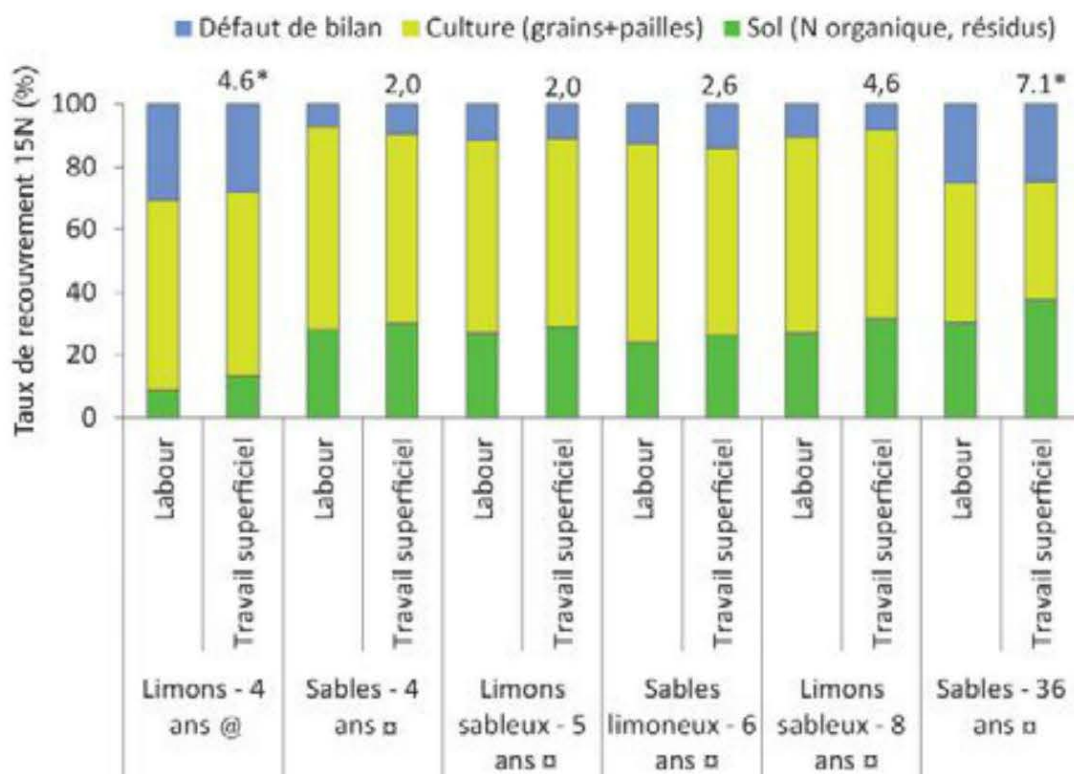


Figure 4.5 : Taux de recouvrement de l'azote issu d'un apport d'engrais marqué ^{15}N dans le sol et la plante apporté sur céréales à pailles en fonction du type de travail du sol, du type de sol et du nombre d'années de différenciation du travail du sol. @= données de Giacomini *et al.*, 2010 (essai INRA de Mons-80). α=données de Thomsen et Christensen 2007. Les chiffres représentent la différence de taux de recouvrement dans le compartiment sol entre le travail superficiel et le labour : * = différence significative au seuil de 5%. Sur l'ensemble des essais, la différence moyenne de 3.8 % est significative au seuil de 5 % (test de Student de comparaison de moyennes appariées).

le phénomène grâce à des techniques de traçage isotopique de l'azote fournissent des résultats variables. Dans la plupart des cas, la simplification du travail du sol n'induit pas de différences significatives en termes de quantités d'azote organisées au sein de la matière organique (figure 4.5 pour quelques exemples). Cependant, le regroupement de l'ensemble des résultats indique une tendance à une organisation légèrement supérieure en situations de travail du sol réduit, cette tendance semblant plus marquée quand l'historique de différenciation est long. Elle reste néanmoins modérée (inférieure à 4 % en moyenne d'azote organisé en plus en situation de travail superficiel par rapport au labour).

Efficacité d'absorption de l'azote de l'engrais par les cultures

La conséquence de la compétition entre l'absorption de l'azote et les diverses « pertes » détaillées ci-dessus peut être estimée au champ par l'efficacité de l'azote issu de l'engrais, via le coefficient apparent d'utilisation (CAU) ou le coefficient réel d'utilisation (CRU nécessitant un traçage de l'azote par l'isotope ^{15}N). La figure 4.6 rassemble plusieurs résultats de comparaison de ces deux indicateurs (mesurés sur des céréales ou du colza) entre des modalités labour et semis direct, toutes choses égales par ailleurs dans des dispositifs expérimentaux pour la plupart

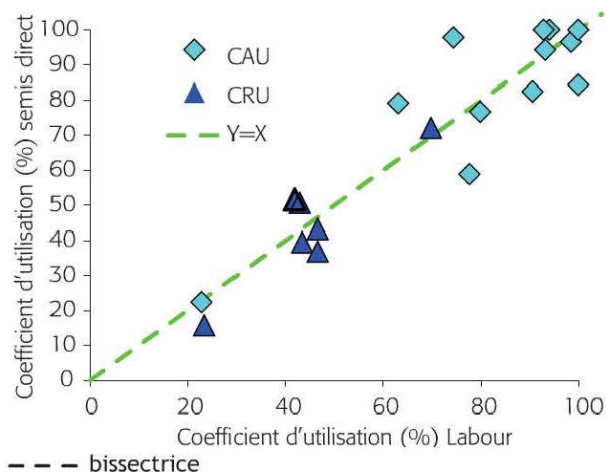


Figure 4.6 : Comparaison des Coefficients apparents (CAU) ou réels (CRU) d'utilisation de l'azote issu de l'engrais mesurés dans des expérimentations au champ conduites en semis direct ou en labour. Données bibliographiques citées dans Le Souder *et al.*, 2007 : Lopez-Bellido *et al.*, 2001, ITCF-Cetiom, 1999, Bordes JP *et al.*, 1983, Villecroze F., 1985. Données supplémentaires : Giacomini *et al.*, 2010, essai Environnement Arvalis de Boigneville (91). Les moyennes ne diffèrent pas significativement au seuil 5 % (test de Student de comparaison de moyennes appariées).

français. Bien que des résultats élémentaires puissent démontrer des écarts significatifs (et difficilement explicables à l'aide des enregistrements et observations disponibles sur les essais), on ne mesure pas d'écart moyen significatif de coefficient apparent d'utilisation ou de coefficient réel d'utilisation de l'azote issu de l'engrais en fonction de l'intensité du travail du sol.

Quelle adaptation de la conduite de la fertilisation azotée en cas de réduction du travail du sol ?

En premier lieu, il faut rappeler qu'on s'intéresse à la simplification du travail du sol intervenant comme seul facteur de variation de l'itinéraire technique. Par exemple, cela ne couvre donc pas les pratiques combinant les techniques culturales simplifiées avec l'implantation de couverts végétaux à forte production de biomasse. Ce choix restreint la portée des conclusions mais correspond néanmoins encore à de nombreuses situations rencontrées sur le terrain. Deuxièmement, il est probable que les adaptations éventuelles dans la conduite de la fertilisation azotée soient, pour des points particuliers, fonction du niveau de simplification du travail du sol. Enfin, il n'est pas possible de tester tous les facteurs et toutes les conditions dans des expérimentations. Les recommandations présentées sont donc fondées sur des résultats expérimentaux partiels, que l'on tâche de généraliser en s'appuyant sur les connaissances disponibles sur le cycle de l'azote dans les systèmes cultivés.

Concernant les fournitures d'azote par minéralisation de l'humus, on n'observe pas de différence dans la nature du processus ou dans l'intensité de celui-ci (au moins à l'échelle de temps compatible avec les interventions techniques). Il ne semble donc pas pertinent de modifier les références actuelles en fonction des différentes variantes de travail du sol. **Concernant les fournitures d'azote par minéralisation des résidus végétaux**, dans les cas extrêmes où aucun enfouissement ne serait réalisé, on peut s'attendre à un décalage des cinétiques d'organisation et de minéralisation des résidus sous la culture suivante accompagnée au final par une minéralisation nette légèrement plus importante. Cependant, on ne se trouve probablement pas face à des flux très importants d'azote : une dizaine de

kilos d'azote/ha dans les cas les plus impactants, sans présence de forte biomasse de couverts intermédiaires restituée au sol. Il est donc probable que les cas de « démarrage ralenti » observés en sortie de l'hiver sur des cultures conduites en travail du sol simplifié ne sont pas causés par un déficit de fourniture d'azote par le sol, mais par d'autres phénomènes physiologiques, en lien par exemple avec la température plus faible de l'horizon de surface pouvant affecter la croissance précoce de la culture. En l'occurrence, la pratique parfois préconisée de « précocification » des apports d'azote dans ces situations ne semble pas opportune, ce que de récentes expérimentations commencent à confirmer (Cohan *et al.*, 2013b). Les besoins en azote des cultures n'étant pas modifiés si leur production n'est pas affectée, le principal impact de la réduction du travail du sol porterait sur **l'efficacité des apports d'engrais**. Une concentration en matière organique en surface est favorisée par la simplification du travail du sol et celle-ci peut entraîner une **organisation** légèrement accrue de l'azote issu de l'engrais au sein de la matière organique humifiée. Celle-ci n'excède néanmoins pas quelques pour-cent de l'azote apporté. Compte tenu des conditions du milieu en jeu, les situations où la réduction du travail du sol pourrait entraîner une augmentation des pertes par **volatilisation ammoniacale** concernent essentiellement des épandages précoces d'engrais sur résidus végétaux abondants avant culture ou sur culture peu développée (épandage de produits résiduels organiques avant maïs par exemple). Dans le cas d'apport d'engrais minéraux sur cultures d'hiver développées, une augmentation des pertes en situation de travail du sol réduit est moins probable. La recherche de solution technique pour enfouir systématiquement tous les apports d'azote en situations de travail du sol réduit ne peut qu'aller dans le sens d'une meilleure efficacité des apports, mais n'est vraiment indispensable que dans un nombre restreint de situations cumulant plusieurs facteurs de risques liés à l'organisation d'azote et à la volatilisation ammoniacale.

En conclusion, une diminution de l'intensité du travail du sol, accompagnée de quelques précautions pour les pratiques les plus extrêmes, ne devrait pas entraîner de modifications marquantes de dose totale apportée aux cultures. En particulier, ces situations peuvent bénéficier des outils actuellement disponibles pour calculer une dose d'azote prévisionnelle, et pour piloter les apports en cours de campagne. Dans une optique d'optimisation agro-écologique des systèmes de culture, c'est l'augmentation de la couverture du sol par des couverts végétaux à forte production qui est susceptible de fortement modifier les flux d'azote et les pratiques de fertilisation, que l'on maintienne le labour ou pas (Constantin *et al.*, 2010, Laurent et Fontaine, 2006).

Travail du sol et stockage de carbone

De très nombreux travaux mais la controverse subsiste

La concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO₂) a augmenté de plus de 115 ppm au cours des 250 dernières années, soit 42 %, atteignant 394 ppm en 2013 (Tans et Keeling, 2013). De plus, la vitesse d'augmentation ne fait que s'accroître. Or les sols du monde stockent, sous forme de matières organiques,

1 500 à 2 400 milliards de tonnes de carbone soit deux à trois fois plus de carbone que ce qui est contenu dans l'atmosphère (850 milliards de tonnes).

Le mode d'occupation du sol et les pratiques agricoles ont un impact important sur le stockage de carbone. Optimiser ces systèmes représente l'une des solutions à faible coût proposée pour réduire l'accroissement du CO₂ atmosphérique en augmentant le stockage de carbone dans le sol ou dans la végétation : c'est ce que l'on appelle la séquestration de carbone (Smith *et al.*, 2008).

Dans le cas des sols cultivés, trois pratiques sont mises en avant pour accroître la séquestration de carbone : améliorer la gestion des résidus de culture, installer des cultures intermédiaires ou des plantes de service et réduire le travail du sol jusqu'au semis direct (Smith *et al.*, 1998 ; Lal, 2004 ; Smith *et al.*, 2008; Lal, 2011; Powlson *et al.*, 2012). Sur les deux premières pratiques, il y a un consensus général pour conclure que les stocks de carbone du sol augmentent lorsque les résidus de culture sont restitués plutôt qu'exportés (e.g. Powlson *et al.*, 2011a) ou lorsque des cultures intermédiaires sont pratiquées régulièrement (Constantin *et al.*, 2010 ; Justes *et al.*, 2012). Pour la troisième pratique, bien que le travail réduit du sol puisse favoriser la séquestration de carbone, il n'y a pas de consensus sur l'importance de cet effet dans des systèmes conduits de façon continue en semis direct, notamment à cause de la grande variabilité dans les mesures (Ogle *et al.*, 2012).

Malgré les grands efforts faits pour quantifier les bénéfices du semis direct sur les stocks de carbone du sol, avec des milliers d'études³ et plusieurs méta-analyses, la controverse n'est pas levée. Le leitmotiv des années 1980-2005 était que le semis direct permettait de séquestrer de fortes quantités de carbone. Ce bénéfice escompté, ainsi que la réduction des coûts de production et la lutte contre l'érosion des sols, ont contribué à l'expansion du semis direct pendant les trois dernières décennies en Amérique du Nord, Amérique du Sud et Australie. Mais l'importance de la séquestration de carbone a été remise en cause au cours de ces dernières années avec de nouvelles études plus rigoureuses et des « méta-analyses », c'est-à-dire des analyses faisant la synthèse d'études publiées précédemment mais avec des critères de sélection rigoureux.

Ceci a conduit à revoir fortement à la baisse le potentiel de séquestration du carbone lié au travail du sol. Ainsi les prévisions de Smith *et al.* (1998) indiquaient que le potentiel de séquestration dans l'Union Européenne avec une conversion complète en semis direct était de 0.73 % par an, soit 3.7% du stock de carbone des sols au bout de 50 ans. Dix ans plus tard, ces mêmes auteurs (Smith *et al.*, 2008) estimaient que le potentiel était de 3 à 12 % du stock pour des situations tempérées sèches ou humides et en jouant à la fois sur le travail du sol et la gestion des résidus de culture. Pourtant, les normes guides de l'IPCC (2006) indiquaient qu'un sol de zone tempérée contenant 40 t C/ha avec labour pourrait séquestrer un supplément de 6 t C/ha au bout de 20 ans de conversion en semis direct, ce qui semble très exagéré au vu des dernières études.

3. La seule recherche dans le Web of Science avec les mots-clés « tillage + soil + carbon + sequest* » sur les années 2000-2014 donne déjà 1911 références.

Les résultats ré-analysés avec des méthodes rigoureuses

Certains auteurs tels que Baker *et al.* (2007) ont souligné qu'une des faiblesses importantes des protocoles d'échantillonnage était la faible profondeur des mesures (souvent 15 ou 20 cm), ce qui avait pu biaiser les résultats. Ils indiquent que « la croyance répandue que le travail du sol réduit favorise la séquestration de carbone peut simplement être un artefact lié à la méthode d'échantillonnage ». Pour tenir compte de cette critique et d'autres, les trois méta-analyses qui ont été publiées récemment (Angers et Eriksen-Hamel, 2008 ; Luo *et al.*, 2010 ; Virto *et al.*, 2012) ont sélectionné les études qui satisfaisaient les critères suivants : comparaison de deux traitements contrastés (labour et semis direct), autres pratiques culturales identiques, mesure de la densité apparente du sol, calcul à masse de sol équivalente et non à profondeur constante, durée de différenciation suffisante (au moins 5 ans), prélèvement profond (au moins 30 cm) et information sur les rendements des cultures et sur les restitutions de carbone au sol.

Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus dans ces trois études, en comparaison avec la première synthèse faite par West et Post en 2002. Il montre que les trois méta-analyses ont appliqué des critères beaucoup plus stricts que la synthèse de West et Post, et qu'en conséquence elles ont éliminé un très grand nombre d'études insatisfaisantes : ainsi le nombre de traitements publiés avant l'année 2000 est passé de 246 à moins de 27. Il souligne aussi qu'une grande majorité des études provient d'Amérique du Nord.

Tableau 4.1 : Comparaison de la synthèse initiale de West & Post (2002) et des 3 méta-analyses récentes faites sur l'effet du travail du sol sur le stockage de carbone : critères retenus, essais sélectionnés et résultats sur le stockage de carbone.

Critères	Traitements	West & Post (2002)	Angers et al (2008)	Luo et al (2010)	Virto et al (2011)
		(1) NT ou RT / FIT	NT / FIT	NT / FIT	NT / FIT
	Historique	-	-	-	identique
	Rotation, fertilisation	-	identiques	identiques	identiques
	Durée	-	> 5 ans	> 5 ans	> 5 ans
	Profondeur	-	≥ 30 cm	≥ 40 cm	≥ 30 cm
	Calcul par	(2) profondeur	masse	masse	masse
Sélection	Nombre de sites	59	23	29	37
	Nombre de traitements				
	années 1970-2000	246	21	10	27
	années 2001-2012	30	26	59	65
	en Amérique du nord	80%	83%	75%	77%
	en Amérique du sud	9%	11%	9%	13%
Résultats	Durée moyenne (ans)	8	16	13	15
	Stockage C (t/ha)	(3) 8.5	4.9	-0.2	2.1
	Effet type de sol	-	non	-	non
	Effet climat	-	non	non	non
	Effet durée essai	-	oui	non	non
	Effet dose C restituée	-	-	oui	oui
	Effet profondeur	-	oui	oui	oui

(1) NT = semis direct ; RT = travail superficiel ; FIT = labour

(2) Le calcul du stock est fait soit à profondeur constante, soit à masse de terre constante

(3) Le stockage de C est la différence entre le stock mesuré en semis direct et le stock en labour mesurés à la fin de l'essai. Dans l'étude de Virto *et al.* (2011), le stockage a été recalculé compte tenu d'erreurs avérées dans certains essais.

La quantité moyenne supplémentaire de carbone séquestré avec le semis direct est de 8.5 t C/ha dans la synthèse de West et Post. Elle est beaucoup plus faible avec les trois méta-analyses : 4.9, -0.2 et 2.1 t C/ha, alors qu'elles concernent pourtant des essais plus anciens (13 à 16 ans au lieu de 8 ans). Cependant, ces moyennes peuvent regrouper une très grande variabilité de situations : dans l'étude de Virto *et al.* (2011), la séquestration varie de -39 à +70 t C/ha. Ces valeurs extrêmes semblent impossibles, ne serait-ce que parce qu'elles sont du même ordre de grandeur que les quantités totales cumulées de carbone restitué au sol. Elles peuvent être attribuées soit à des problèmes de mesure, soit au protocole qui compare parfois des parcelles qui étaient initialement très différentes.

Quels facteurs de séquestration ?

Les méta-analyses ont cherché à identifier les causes de variation de la séquestration de carbone. Elles n'ont pu mettre en évidence un effet type de sol ou de climat. Par contre, Virto *et al.* (2012) ont montré que le principal facteur expliquant la variabilité de la séquestration de carbone était la quantité de carbone restitué au sol chaque année. Lorsque le semis direct conduit à une augmentation des rendements (et donc les restitutions de résidus de culture), on observe – logiquement – un stockage additionnel de carbone. Inversement on peut déstocker du carbone en semis direct dans le cas où celui-ci entraîne une baisse des rendements. L'effet du mode de travail sur sol sur la production des cultures est donc le premier facteur à considérer lorsqu'on veut prévoir le stockage de carbone. Cette conclusion est confirmée par Luo *et al.* (2010) qui concluent que « accroître la fréquence de culture (ou les restitutions) pourrait être une stratégie plus efficace pour séquestrer du carbone que faire du semis direct ».

En ce qui concerne l'effet de la durée de différenciation du mode de travail du sol, seule l'analyse de Angers et Eriksen-Hamel (2008) a trouvé une corrélation entre quantité séquestrée et âge de l'essai. Cependant cette corrélation n'est significative que grâce à un point de mesure et disparaît si l'on enlève ce point. La quasi-absence de corrélation entre le stockage de carbone lié à la réduction du travail du sol et la durée de ce changement observée dans les quatre études est paradoxale. Elle s'oppose à l'hypothèse d'une vitesse de séquestration constante telle que le fait l'IPCC (2006) ou même d'une vitesse décroissante qui est prédite par les modèles de simulation des stocks de matière organique.

La distribution de carbone dans le profil de sol

Un point sur lequel il existe un consensus total est que le travail réduit et *a fortiori* le semis direct conduisent à accroître la teneur en matière organique (à ne pas confondre avec le stock) dans les 10 à 15 premiers cm du sol. Ce fait incontestable est sans doute la raison pour laquelle de nombreux auteurs (y compris scientifiques) ont conclu à un enrichissement global du sol en matière organique. Cependant le stockage de carbone doit être analysé sur l'ensemble du profil et pas seulement en surface du sol. La méta-analyse de Luo *et al.* (2010) a étudié l'écart de stock de carbone entre semis direct et labour, par couche de 10 cm jusqu'à

60 cm en valeur moyenne. Elle montre que le stock de carbone sur la couche 0-10 cm est en moyenne accru de 3.1 t/ha mais qu'il diminue simultanément en dessous de 10 cm : de -0.7 t/ha dans la couche 10-20 cm et de -2.3 t/ha dans la couche 20-30 cm. Le stock de carbone dans la couche 30-40 cm est aussi plus faible en semis direct qu'en labour (-1.0 t/ha), puis les stocks sont identiques en-dessous de 40 cm. Angers et Eriksen-Hamel (2008) ont trouvé une distribution très comparable jusqu'à 80 cm de profondeur lorsqu'ils utilisent la moyenne géométrique des mesures. Le même type de profil est également observé dans les essais français (Viaud *et al.*, 2011 ; Dimassi *et al.*, 2013, 2014). On retiendra donc que dans de nombreux essais, le gain de carbone obtenu dans la couche de surface est complètement annulé par la perte de carbone observée en profondeur.

En conclusion, nous partageons l'avis de Powlson *et al* (2014) : "il existe un large corpus de données expérimentales montrant que le supplément de carbone organique du sol en semis direct est relativement faible : c'est souvent une augmentation apparente provenant d'une modification de la distribution du carbone dans le sol".

L'évolution des stocks de carbone au cours du temps

En fait, très peu d'études ont analysé l'évolution des stocks de carbone au cours du temps en fonction du mode de travail du sol (approche « diachronique »). Dans leur très grande majorité, les études publiées sont des approches « synchroniques », c'est-à-dire comparant les stocks entre deux techniques à un moment donné. L'inconvénient de ces approches a été souligné par Neto *et al.* (2010) : "Avec des couples de parcelles pour lesquelles il n'y pas de vraie répétition des traitements, l'hétérogénéité des conditions initiales peut créer un sérieux biais dans les approches synchroniques." Il est donc très important d'analyser les effets du travail du sol au cours du temps dans des expérimentations de long-terme incluant des mesures précises faites au temps zéro. C'est précisément l'une des originalités du dispositif de Boigneville, conduit par Arvalis - Institut du végétal depuis 20 à 40 ans. Ce dispositif comprend 5 essais :

- l'essai A « travail du sol » démarré en 1970 et toujours en activité ;
- l'essai B « travail du sol irrigué » démarré en 1970 et arrêté en 1982 ;
- l'essai C « monoculture de maïs » démarré en 1970 et arrêté en 1994 ;
- l'essai D « monoculture de blé » démarré en 1970 et toujours en activité ;
- l'essai E « environnement » démarré en 1991 et toujours en activité ;

L'essai A constitue l'essai principal, en termes de nombre de traitements et de densité de suivi dans le temps. C'est celui que nous examinerons surtout ici. C'est l'un des essais travail du sol les plus anciens dans le monde et le seul aussi ancien qui permette une approche diachronique. Il compare trois traitements de travail du sol : labour, travail superficiel et semis direct, et leur interaction avec d'autres pratiques culturales, l'exportation des pailles, une autre rotation et la présence de cultures intermédiaires. Il inclut des mesures de densité apparente, des calculs de

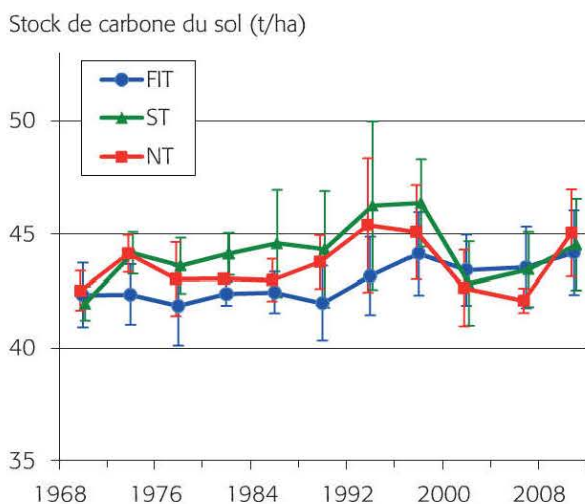


Figure 4.7 : Evolution des stocks de carbone du sol dans les 3 traitements de travail du sol de l'essai A de Boigneville, pendant 41 ans. FIT = labour annuel ; ST = travail superficiel ; NT = semis direct. Les valeurs sont la moyenne de tous les autres traitements. D'après Dimassi *et al.* (2014).

stocks à masse de sol équivalente et en dessous de 30 cm, ce qui est conforme aux recommandations actuelles de l'IPCC. L'ensemble des données sols et plantes a été analysé et compilé en base de données (Dimassi, 2013 ; chapitre 2).

Les rendements des cultures (maïs et blé) ont été en moyenne identiques pour les trois modalités de travail du sol, de même que les indices de récolte. On peut donc conclure que les restitutions de résidus de culture aériens ont été similaires. Il en est probablement de même pour les résidus racinaires, même si les références disponibles sur ce sujet sont peu nombreuses (Qin *et al.*, 2004, 2006).

La figure 4.7 présente l'évolution des stocks de carbone mesurés au cours de la période 1970-2011 dans les trois traitements continus. Elle montre une évolution légèrement croissante et assez régulière des stocks dans le traitement labour : le stock (calculé sur 4 060 t/ha, soit 0-28 cm) est passé de 42.3 à 44.2 t/ha en 41 ans. Par contre l'évolution mesurée en travail superficiel ou en semis direct est plus variable dans le temps. L'évolution des quantités de carbone séquestré imputable au travail du sol réduit (obtenues par différence des stocks avec le traitement labour) est donnée à la figure 4.8. Elle fait apparaître des phases de séquestration (années 1974, 1994) puis de déstockage de carbone (années 2002, 2011). L'analyse statistique montre que ces variations sont significatives et pas seulement dues à la variabilité spatiale des mesures. Par ailleurs, les résultats obtenus sur les essais

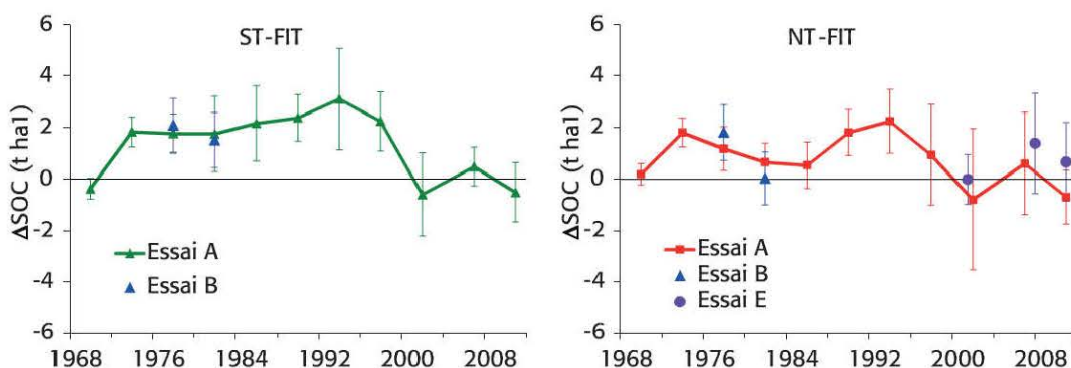


Figure 4.8 : Evolution de la quantité de carbone séquestrée dans le sol due au travail du sol dans les essais de long-terme à Boigneville : graphique de gauche = effet du travail superficiel (ST) ; graphique de droite = effet du semis direct (NT). Le labour (FIT) est pris comme référence. L'essai A constitue l'essai le plus long (41 ans). D'après Dimassi *et al.* (2014).

B et E sont également cohérents avec l'essai A, confirmant ainsi l'existence de ces phases de stockage et déstockage. Il peut paraître surprenant que ce type de phénomène n'ait pas été identifié antérieurement dans la littérature. Cependant nous avons souligné que les études diachroniques sont rares (seulement 5 répertoriées) et présentent une forte variabilité spatiale qui ne permet pas d'identifier une variation temporelle (Dimassi *et al.*, 2014).

Les facteurs climatiques expliquent les variations de C séquestré

Dans l'essai de Boigneville, la faible variabilité spatiale des mesures (coefficient de variation moyen = 3.5 %) a permis de calculer les vitesses d'évolution des stocks de carbone entre 2 dates successives de mesure, séparées de 4 ans. Ces vitesses ont été mises en relation avec les données climatiques : température de l'air (T), pluviométrie (P), pluviométrie + irrigation (P+I), bilan hydrique (P+I-ETP), indice d'aridité ((P+I)/ETP), mesurées pendant la même période de temps. On observe des corrélations significatives, toujours négatives, avec presque toutes les variables et tous les traitements. La pluviométrie a varié de 518 à 798 mm/an et le bilan hydrique de -232 à +126 mm/an. La plus forte corrélation s'observe avec le bilan hydrique dans la couche de surface du traitement semis direct (figure 4.9). Cette relation indique qu'en semis direct, les périodes sèches favorisent le stockage de carbone en surface tandis que les périodes humides favorisent le déstockage de carbone. Ce phénomène est attribué à l'effet des conditions d'humidité de surface sur la décomposition des matières organiques fraîches. Cette relation existe aussi dans le traitement labour mais elle est très atténuée parce que l'amplitude de la variation temporelle de l'humidité du sol dans le voisinage de ces matières organiques est beaucoup plus faible. En conséquence, la séquestration de carbone associée à la réduction du travail du sol est fortement dépendante des conditions climatiques : c'est un phénomène réversible et pas du tout constant dans le temps.

Les résultats obtenus à Boigneville au cours du temps peuvent être comparés aux approches multisites faites au Canada par Van den Bygaart *et al.* (2011) ou en Espagne par Blanco-Moure *et al.* (2013). Au Canada, les auteurs observent une séquestration dans la région Ouest, en climat semi-aride (pluviométrie moyenne 408 mm/an), mais pas dans la région Est qui est beaucoup plus humide

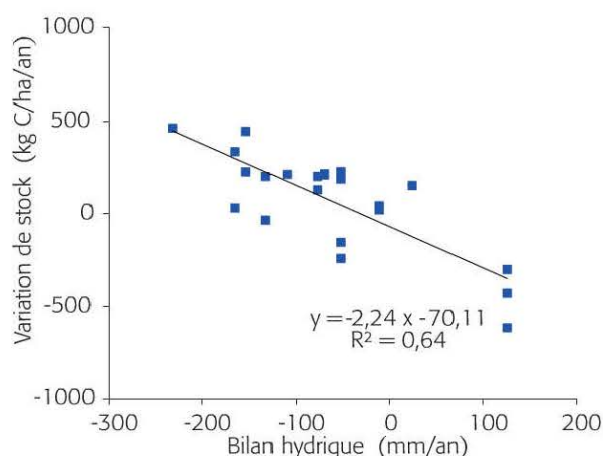


Figure 4.9 : Relation entre les variations de stock de carbone observées entre 2 dates de mesure (périodes de 4 ans) et le bilan hydrique mesuré sur la même période, dans la couche 0-5 cm du traitement semis direct de l'essai A de Boigneville. D'après Dimassi *et al.*, 2014.

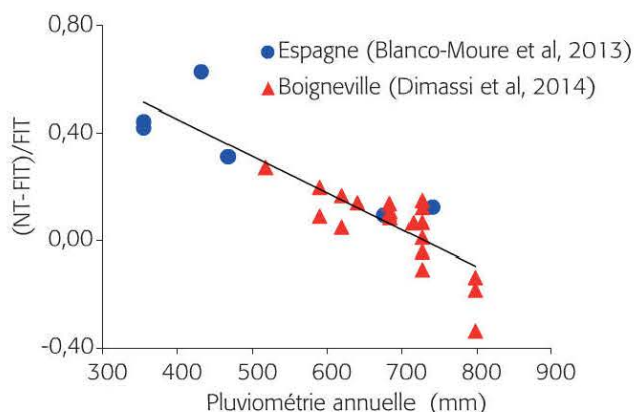


Figure 4.10 : Relation entre le taux de séquestration relatif de carbone en semis direct et la pluviométrie annuelle observé sur 6 sites en Espagne (cercles bleus) et sur 10 intervalles de temps dans l'essai A de Boigneville (triangles rouges). D'après Dimassi *et al.*, 2014.

(955 mm/an). En Espagne, la séquestration de carbone obtenue après 9 à 19 ans de semis direct en Aragon a été comparée sur 6 sites cultivés qui sont soumis à une pluviométrie très variable : 355 à 741 mm/an. Les auteurs montrent que la séquestration de carbone due au semis direct, exprimée en différence relative entre les stocks de carbone en semis direct et en labour, est beaucoup plus forte en climat semi-aride qu'en climat plus tempéré (figure 4.10). Le même type de calcul, appliqué à Boigneville par intervalle de temps, confirme la tendance générale linéaire décroissante entre séquestration et pluviométrie.

L'alternance du mode de travail du sol

Nous avons jusqu'ici analysé les résultats d'essais conduits de façon continue en travail du sol réduit. Une question récurrente concerne les alternances de mode de travail et en particulier le labour introduit de façon occasionnelle dans des systèmes en semis direct. L'opinion quasi générale à ce sujet est celle de Powlson *et al.* (2014) : « Un travail du sol périodique conduira à une perte considérable de SOC accumulé en surface du sol pendant les années de semis direct, de sorte que la séquestration de carbone et les bénéfices sur la mitigation du changement climatique sont perdus ou fortement réduits ». Cependant ces auteurs appuient leur conclusion sur un nombre très restreint de situations expérimentales. Les résultats disponibles à ce jour sont plus nombreux ; nous les avons résumés au tableau 4.2.

Les 12 études publiées concernent des expérimentations conduites majoritairement en semis direct (2 en travail superficiel), pendant une période allant de 6 à 46 ans, ayant ensuite subi un labour occasionnel (une fois) ou un labour pratiqué chaque année. Les résultats montrent qu'aucune variation significative du stock de carbone n'est observée après ce labour dans 9 des 12 sites étudiés. Cette absence de réponse s'observe dans une situation très ancienne (46 ans de semis direct) ainsi qu'en France dans l'essai E de Boigneville (Dimassi *et al.*, 2013). Dans le dixième site (Van den Bygaart et Kay, 2004), les auteurs ont étudié 4 types de sol dans une même parcelle et n'ont trouvé de variation significative que dans un sol sur 4. Stockfisch *et al.* (1999) ont trouvé une chute immédiate mais leur protocole ne comportait pas de témoin semis direct continu. Quant à Koch et Stockfisch (2006), ils ont trouvé une baisse de 4-6 % du stock au bout de 2 ans. Cette revue

Tableau 4.2 : Synthèse des études faites sur l'impact d'un changement de travail du sol (travail réduit ► labour) sur le stock de carbone du sol. ST = travail superficiel ; NT = semis direct. D'après Dimassi et al. (2013).

Référence	Site	Pays	Traitement avant			Mesure du stock SOC après changement		
			Type	Durée années	Changement	Durée années	Prof cm	Effet sur Stock C
Pierce et al. (1994)	East Lansing	USA	NT	6	1 labour	1	0-20	aucun changement
Stockfisch et al. (1999)	Goettingen	Allemagne	ST	20	1 labour	0,5	0-50	chute immédiate
Kettler et al. (2000)	Sidney	USA	ST	20	1 labour	5	0-30	aucun changement
Vandenbygaart & Kay (2004)	Ontario	Canada	NT	22	1 labour	1,5	0-30	pas de changement (3 sites sur 4)
Koch & Stockfisch (2006)	Goettingen	Allemagne	NT	6	1 labour	2	0-45	2-6% diminution
Grandy & Robertson (2006)	KBS	USA	NT	46	Labour annuel	3	0-20	aucun changement
Quincke et al. (2007)	Lincoln	USA	NT	11	1 labour	1	0-30	aucun changement
Yang et al. (2008)	Woodslee	Canada	NT	13	Labour annuel	8	0-20	aucun changement
Baan et al. (2009)	3 sites, Sask.	Canada	NT	>10	1 labour	0,5	0-15	aucun changement
Wortmann et al. (2010)	Lincoln	USA	NT	12	1 labour	5	0-30	aucun changement
Wortmann et al. (2010)	Mead	USA	NT	8	1 labour	5	0-30	aucun changement
Dimassi et al. (2013)	Boigneville	France	NT	15	Labour annuel	6	0-40	aucun changement

montre donc que, contrairement aux idées reçues, le travail du sol occasionnel n'a souvent aucune conséquence sur le stock de carbone du sol et que lorsqu'elle se produit, la baisse du stock reste très modérée.

Travail du sol et émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre

Les trois principaux GES d'origine agricole sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Leur concentration atmosphérique actuelle respective est très différente : 395, 1.82 et 0.33 ppm (µl/l air). Mais compte tenu de leur pouvoir de réchauffement relatif (respectivement 1, 23 et 300), les trois gaz contribuent tous fortement au réchauffement de la planète.

Les émissions de CH₄ d'origine agricole ont deux origines principales : la production par le sol dans les zones de cultures inondées, telles que les rizières, et l'élevage bovin avec une production dans le rumen. Dans les deux cas ce sont des micro-organismes méthanogènes qui se développent dans des conditions anoxiques.

Dans les sols cultivés, aérés, la production est très faible et est même souvent légèrement négative (consommation du méthane ambiant).

Les émissions de CO_2 en agriculture sont le bilan entre la photosynthèse (consommateur de CO_2) et la respiration (productrice). On distingue la respiration autotrophe (respiration de la plante) et la respiration hétérotrophe par les organismes vivants du sol (principalement microorganismes). Il existe un lien très étroit entre les émissions de CO_2 et les variations de stock de C du sol. Pour les plantes annuelles récoltées dont la biomasse est remise à zéro chaque année, le flux net annuel de CO_2 (F_c) est la différence entre la quantité de C restitué au sol chaque année et la variation annuelle du stock de C organique (ΔSOC) : $F_c = \text{C restitué} - \Delta\text{SOC}$.

Lorsqu'on compare deux traitements de travail du sol, la différence d'émission de CO_2 entre ces traitements est $\delta F_c = \delta \text{C restitué} - \delta \text{SOC}$, où δ indique la différence entre traitements de travail du sol. Les émissions de CO_2 liées au mode de travail du sol peuvent donc être calculées soit directement par des méthodes de mesure des flux (méthodes micro-météorologiques avec des « tours à flux »), soit indirectement à l'aide de cette dernière formule, par des mesures de stock et de biomasses restituées. C'est la méthode indirecte qui a été le plus employée à ce jour. On notera qu'à rendement identique, la différence d'émission entre deux traitements de travail du sol est égale à leur différence de stock de carbone dans le sol : $\delta F_c = -\delta \text{SOC}$.

Les facteurs d'émissions de N_2O

Les émissions de N_2O proviennent essentiellement des sols, et résultent de deux processus : la nitrification et la dénitrification. La dénitrification est le processus le plus émetteur, même si la contribution de la nitrification semble être non négligeable. La nitrification est réalisée par un petit nombre de bactéries aérobies, sa vitesse est accrue par l'aération du sol et la quantité d'ammonium dans le sol. Elle est particulièrement stimulée par les apports de produits azotés et *a priori* peu dépendante du mode de travail du sol. La dénitrification est un processus anaérobie, réalisée par de nombreuses espèces bactériennes, qui réduisent le nitrate (NO_3^-) en diazote (N_2), sans inconvénient car c'est un gaz non réactif, mais aussi en N_2O . Ceci est dû au fait que les bactéries dénitrifiantes possèdent ou non le gène de réduction du N_2O en N_2 . Les facteurs qui stimulent l'émission de N_2O par dénitrification sont l'humidité du sol, son acidité (pH faible, avec une diminution de la capacité de réduction du N_2O en N_2), sa teneur en carbone organique, et la présence de mulch en surface du sol. Or il se trouve que tous ces facteurs sont accrus (dans la couche 0-15 cm) par l'absence de travail du sol, ce qui devrait *a priori* favoriser les émissions en semis direct. Les autres facteurs importants sont la concentration en nitrate, la température, et le tassement du sol qui détermine le taux de saturation en eau du sol. Enfin, le mode de travail du sol peut modifier à long terme la structure des communautés microbiennes, et donc leur activité potentielle. La conjonction des deux processus émetteurs de N_2O et des nombreux facteurs qui les déterminent explique la difficulté que nous avons

à comprendre le déterminisme des émissions mesurées *in situ* et la variabilité des réponses associées à une pratique agricole telle que le mode de travail du sol.

Les synthèses sur les émissions de N₂O

La première synthèse faite sur l'effet du travail du sol sur les émissions de N₂O est celle de Six *et al.* (2004). Elle a montré que les systèmes nouvellement convertis au semis direct émettent davantage de N₂O dans les premières années que des systèmes en labour annuel, mais que cette tendance s'annulait au cours du temps. Germon *et al.* (2007) ont complété cette analyse avec d'autres résultats et confirmé cette conclusion. Ils ont aussi souligné que l'écart entre modes de travail du sol était moins grand lorsque les mesures étaient faites sur des temps longs (plus de 6 mois), montrant la nécessité de mesures continues. La synthèse la plus complète est la méta-analyse de Van Kessel *et al.* (2013) qui a sélectionné des essais qui comparaient semis direct ou travail réduit et labour, ayant eu une rotation et une fertilisation identiques, comportant des mesures *in situ* pendant au moins un cycle de culture, avec des données de rendement, et des répétitions. La sélection a porté sur 41 études avec 239 traitements, des études majoritairement d'Amérique du Nord. Les résultats indiquent que le mode de travail du sol n'affecte pas en moyenne les émissions et qu'il n'y a pas non plus de différence significative en climat humide (correspondant aux conditions françaises). Par contre, les émissions sont stimulées par le semis direct en climat sec (défini par un rapport P/ETP inférieur à 0.65). On retrouve la tendance observée précédemment, à savoir que l'écart d'émission est plus fort dans les dix premières années et s'estompe après, mais cet effet n'est significatif qu'en climat sec.

Emissions et bilan GES en France

En France, quatre sites ont été investigués récemment dans le cadre du projet CASDAR NO-GAS (Legall *et al.*, 2013), incluant l'essai A de Boigneville. Sur ce site, le suivi en continu pendant deux ans indique que c'est la modalité travail superficiel qui a émis le plus de N₂O, et le semis direct qui a émis le moins. Sur les trois autres sites différenciés beaucoup plus récemment (2 ans), les tendances sont contradictoires. Cette contradiction apparente résulte sans doute des effets multiples et variables du mode de travail du sol sur les facteurs qui agissent sur la dénitrification. Il en est ainsi de la densité apparente (et de la porosité du sol) qui peut être soit accrue soit diminuée en semis direct. De plus, la variabilité temporelle des émissions est forte et insuffisamment mesurée dans la plupart des cas, pouvant impliquer une mauvaise précision des données interpolées. On peut espérer que les progrès métrologiques permettront d'améliorer ce point.

Le bilan GES a été calculé à Boigneville (figure 4.11), sur un site où la densité de mesures est très importante. Nous observons que ce sont les émissions de N₂O qui pèsent le plus lourd dans le bilan GES, malgré la diminution des émissions de CO₂ en travail réduit. Le plus faible bilan GES est observé en semis direct, mais il n'est pas statistiquement différent du labour. Par contre le bilan GES en travail réduit du sol est 40 % supérieur à celui du traitement labour.

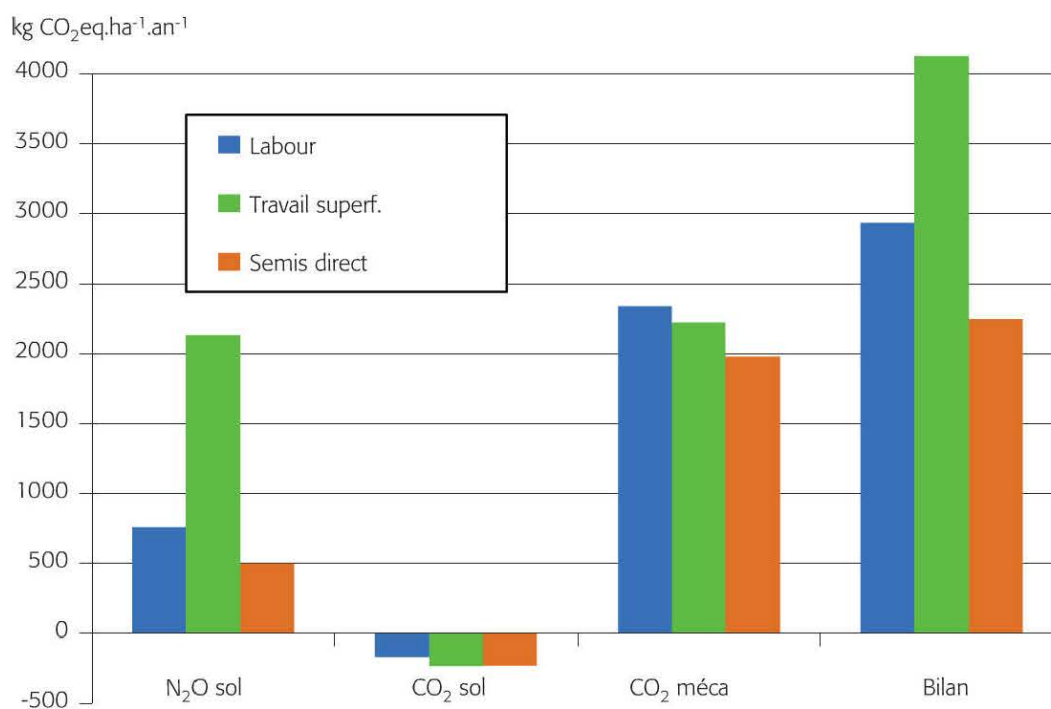


Figure 4.11 : Bilan GES calculé sur l'essai A de Boigneville. Les émissions sont toutes exprimées en kg CO₂ eq ha⁻¹ an⁻¹. N₂O sol = émissions mesurées en continu sur 2 ans (rotation maïs-blé). CO₂ sol = émissions de CO₂ calculées d'après la variation de stock de carbone du sol. CO₂ méca = émissions de CO₂ dues aux opérations de travail du sol (d'après Le Souder *et al.*, 2007). Bilan = somme des 3 sources. Données non publiées.

Conclusions

Au-delà des aspects « azote », cette analyse nous a montré que l'effet majeur de la modification du mode de travail du sol, lorsqu'on passe du labour fréquent vers le semis direct, est la création d'une forte stratification de la matière organique dans le profil. Il s'accompagne toujours d'un accroissement de carbone en surface (0-10 cm), mais très souvent aussi d'une baisse de carbone en profondeur (15-40 cm). Le stock total de carbone est peu ou pas augmenté par le travail réduit du sol, même le semis direct. De plus, l'augmentation n'est pas irréversible mais peut s'annuler lors d'années humides qui favorisent la décomposition des matières organiques en surface. Nous avons montré également que la conversion semis direct - labour (occasionnelle ou non) ne déstocke pas massivement.

Les émissions de N₂O sont en moyenne peu affectées par le travail du sol. Elles semblent accrues en travail réduit dans les premières années de conversion, et identiques voire un peu plus faibles qu'en labour après 10 ans de conversion.

Le bilan GES est en moyenne peu affecté par le travail du sol. Il ne doit donc pas constituer un critère déterminant pour adopter des techniques simplifiées de travail du sol. En conclusion, l'avis de Baker *et al.*, (2007) nous semble toujours d'actualité : "Il est prématuré de donner un potentiel de séquestration aux pratiques de changement de travail du sol... Bien qu'il y ait de bonnes raisons d'utiliser les techniques de conservation, elles ne conduisent pas forcément à séquestrer du carbone".

Références bibliographiques

- Angers D.A., Eriksen-Hamel N.S., 2008. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 1370-1374.
- Baan C.D., Grevers M.C.J., Schoenau J.J., 2009. Effects of a single cycle of tillage on long-term no-till prairie soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 89: 521-530.
- Baker J.M., Ochsner T.E., Venterea R.T., Griffis T.J., 2007. Tillage and soil carbon sequestration: what do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 1-5.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53, 215-230.
- Blanco-Moure N., Gracia R., Bielsa A.C., López M.V., 2013. Long-term no-tillage effects on particulate and mineral-associated soil organic matter under rainfed Mediterranean conditions. *Soil Use & Management*, 29, 250-259.
- CITEPA, 2013. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. *Séries sectorielles et analyses étendues*. CITEPA Ed.
- Cohan J.P., Laurent F., Lellahi A., 2011. Fertiliser les cultures : concilier efficacité technique et défis environnementaux. *DEMETER*, 2011, 269-327.
- Cohan J.P., Charpiot A., Morvan T., Eveillard P., Trochard R., Champolivier L., De Chezelles E., Heurtaux M., Lorinquer E., Espagnol S., 2013a. Quantification des émissions d'ammoniac suite à l'épandage de produits résiduels organiques et d'engrais minéraux au champ. *Congrès COMIFER-GEMAS, 20-21 nov. 2013, Poitiers, France*.
- Cohan J.P., Killmayer M., Bouthier A., Labreuche J., 2013b. Semis direct sous couvert - L'impact sur l'azote en cours d'évaluation. *Perspectives Agricoles*, 406, 52-56.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée-Guide méthodologique pour l'élaboration des prescriptions locales : cultures annuelles et prairie. *Ed. COMIFER 159 p.*
- Constantin J., Mary B., Laurent F., Aubrion G., Fontaine A., Kerveillant P., Beaudoin N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135, 268-278.
- Coppens F., Garnier P., De Gryze S., Merckx R., Recous S., 2006. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. *European Journal of Soil Science*, 57, 894-905.
- Coppens F., Garnier P., Findeling A., Merckx R., Recous S., 2007. Decomposition of mulched versus incorporated crop residues : modelling with PASTIS clarifies interactions between residue quality and location. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 2239-2350.
- Darwis D., 1993. Effet des modalités de gestion de la paille de blé sur l'évolution du carbone et de l'azote au cours de sa décomposition. *Thèse Doctorat INA-PG, Paris*.
- Dimassi B., 2013. Étude de l'impact de travail du sol sur les bilans de carbone à long terme : analyse d'essais de longue durée et modélisation. *Thèse Doctorat INA-PG, Paris*.
- Dimassi B., Cohan J.P., Labreuche J., Mary B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 169, 12-20.
- Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F., Cohan J.P., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188: 134-146.

- Ehlers W., Claupein W., 1994. Approaches toward conservation tillage in Germany. In: Carter, M.R. (Ed.), *Conservation Tillage in Temperate Agroecosystems*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, pp.41-165.
- Findeling A., Garnier P., Coppens F., Lafolie F., Recous S., 2007. Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. *European Journal of Soil Science*, 58, 196-206.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53, 341-356.
- Génermont S., Morvan T., Paillat J.M., Flura D., Saint-Macary H., 2003. Volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier en conditions tropicales. *Séminaire CIRAD, Montpellier 19-20 juin 2002*.
- Germon J.C., Metay A., Lellahi A., Félix I., Labreuche J., Nicolardot B., Gabrielle B., Mary B., Arrouays D., Martin M., Ganteil A., Deseaux S., Reau R., 2007. Impacts des TCSL sur les gaz à effet de serre. *Colloque ADEME, 23 oct. 2007, Paris*.
- Giacomini S.J., Machel J.M., Boizard H., Recous S., 2010. Dynamics and recovery of fertilizer ^{15}N in soil and winter wheat crop under minimum versus conventional tillage. *Soil & Tillage Research*, 108, 51-58.
- Grandy A.S., Robertson G.P., 2006. Aggregation and organic matter protection following tillage of a previously uncultivated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1398-1406.
- IPCC, 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Iqbal A., Beaugrand J., Garnier P., Recous S., 2013. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. *Plant and Soil*, 367, 285-299.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil*, 325, 171-185.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebise J., Savini I., Réchauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote et autres services écosystémiques. *Expertise collective INRA, Paris*.
- Kettler T.A., Lyon D.J., Doran J.W., Powers W.L., Stroup W.W., 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 339-346.
- Koch H.J., Stockfisch N., 2006. Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, 86, 73-83.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal R., 2011. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy* 36, S33-S39.
- Laurent F., Fontaine A., 2006. Pertes d'azote par lessivage - Cultures intermédiaires : une efficacité immédiate et durable. *Perspectives Agricoles*, 327, 26-30.
- Laurent F., Leveau V., 2014. La grande culture face aux (r)évolutions des marchés et politiques agricoles. In *Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ?* S. Pellerin, F. Butler, C. Guiard-Van Laethem coord. *Editions QUAE*, pp 59-72.
- Legall C., 2013. Projet Casdar NO-GAS, 9049. *Compte-rendu final*, 69 pp.

- Le Souder C., Castillon P., Genermont S., Gillet J.P., Laurent F., Lebreton J.C., Malaval C., Nicolardot B., Quere L., Reau R., 2007. Impacts des TCSL sur la dynamique de l'azote et les pertes de composés azotés. *Colloque ADEME, 23 oct. 2007, Paris*.
- Luo Z., Wang E., Sun O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 224-231.
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.
- Neto M.S., Scopel E., Corbeels M., Cardoso A.N., Douzet J.M., Feller C., Piccolo M.C., Cerri C.C., Bernoux M., 2010. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: an on-farm synchronic assessment. *Soil & Tillage Research*, 110, 187-195.
- Ogle S.M., Swan A., Paustian K., 2012. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149, 37-49.
- Oorts K., Laurent F., Mary B., Thiébeau P., Labreuche J., Nicolardot B., 2007. Experimental and simulated soil mineral N dynamics for long-term tillage systems in northern France. *Soil & Tillage Research*, 94, 441-456.
- Oorts K., Bossuyt H., Labreuche J., Merckx R., Nicolardot B., 2007b. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *European Journal of Soil Science*, 58, 248-259.
- Pierce F.J., Fortin M.C., Staton M.J., 1994. Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1782-1787.
- Powlson D.S., Glendining M.J., Coleman K., Whitmore A.P., 2011a. Implications for soil properties of removing cereal straw: results from long-term studies. *Agronomy Journal*, 103, 279-287.
- Powlson D.S., Whitmore A.P., Goulding K.W.T., 2011b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62, 42-55.
- Powlson D.S., Bhogal A., Chambers B.J., Coleman K., Macdonald A.J., Goulding K.W.T., Whitmore A.P., 2012. The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146, 23-33.
- Powlson D.S., Stirling C.M., Jat M.L., Gerard B.G., Palm C.A., Sanchez P.A., Cassman K.G., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4: 678-683.
- Qin R., Stamp P., Richner W., 2004. Impact of tillage on root systems of winter wheat. *Agronomy Journal*, 96, 1523-1530.
- Qin R.J., Stamp P., Richner W., 2006. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland. *Soil & Tillage Research*, 85, 50-61.
- Quincke J.A., Wortmann C.S., Mamo M., Franti T., Drijber R.A., 2007. Occasional tillage of no-till systems: carbon dioxide flux and changes in total and labile soil organic carbon. *Agronomy Journal*, 9, 1158-1168.
- Recous S., Fresneau C., Faurie G., Mary B., 1988. The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop - I. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil*, 112, 205-214.

- Six J., Ogle S.M., Jay Breidt F., Conant R.T., Mosier A.R., Paustian K., 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biology*, 10, 155–160.
- Smith P., Powlson D.S., Glendining M.J., Smith J.U., 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology*, 4, 679–685.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar K., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil Trans Royal Soc London, Series B* 363, 789–813.
- Stockfisch N., Forstreuter T., Ehlers W., 1999. Ploughing effects on soil organic matter after 20 years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil & Tillage Research*, 52, 91–101.
- Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. The European Nitrogen Assessment: sources, effects and policy perspectives. *Cambridge University Press*.
- Tans P., Keeling R., 2013. Recent monthly average Mauna Loa CO₂. *Scripps Institution of Oceanography*. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends
- Thomsen I.K., Christensen B.T., 2007. Fertilizer 15N recovery in cereal crops and soil under shallow tillage. *Soil & Tillage Research*, 97, 117–121.
- VandenBygaart A.J., Kay B.D., 2004. Persistence of soil organic carbon after plowing a long-term no-till field in southern Ontario, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1394–1402.
- VandenBygaart A.J., Bremer E., McConkey B.G., Ellert B.H., Janzen H.H., Angers D.A., Carter M.R., Drury C.F., Lafond G.P., McKenzie R.H., 2011. Impact of sampling depth on differences in soil carbon stocks in long-term agroecosystem experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 226–234.
- Van Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B., Van Groenigen K.J., 2013. Climate, duration and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 19, 33–44.
- Viaud V., Angers D.A., Parnaudeau V., Morvan T., Menasseri-Aubry S., 2011. Response of organic matter to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil. *Soil Use & Management*, 27, 84–93.
- Virto I., Barré P., Burlot A., Chenu C., 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry* 108, 17–26.
- Wortmann C.S., Drijber R.A., Franti T.G., 2010. One-time tillage of no-till crop land five years post-tillage. *Agronomy Journal*, 102, 1302–1307.
- Yang X.M., Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., 2008. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon. *Soil & Tillage Research*, 100, 120–124.
- Webb J., Pain B., Bittman S., Morgan J., 2010. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response - A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, 39–46.
- West T.O., Post W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1930–1946.

Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique

A. BOUTHIER, C. PELOSI, C. VILLENAVE, G. PERES, M. HEDDE, L. RANJARD, J-F. VIAN,
J. PEIGNE, J. CORTET, A. BISPO, D. PIRON

Les écosystèmes terrestres ne sont pas verts... ils sont bruns (Dance, 2008). En effet, la plus grande partie de la biodiversité tellurique est trouvée dans les sols : il est estimé que les sols hébergent environ 25 % du quelque 1,5 million d'espèces vivantes décrites à ce jour (Decaëns *et al.*, 2006 ; Decaëns *et al.*, 2010). Par ailleurs, les communautés des sols contiennent des représentants de tous les principaux taxons terrestres et leur richesse spécifique est sans commune mesure avec celle de la végétation et des faunes épigées.

Pour la France, des données récentes (tableau 5.1) permettent d'illustrer tant la diversité que l'abondance de la vie dans des sols cultivés ou prairiaux.

Ces organismes, tant par leur activité propre que par leurs interactions (notamment trophiques), contribuent au fonctionnement des sols. Ils peuvent être classés en fonction de leur taille mais également de leurs rôles, avec plus ou moins d'exactitude, dans les différentes catégories suivantes :

- les ingénieurs des sols contribuent d'une part à la structure et à la cohésion des sols et d'autre part, à la fragmentation de la matière organique. La macro et méso-faune des sols, comme par exemple les fourmis, les lombriciens, les collemboles, les enchytréides appartiennent à cette catégorie. D'autres organismes microscopiques, comme les champignons ou les bactéries, par leur synthèse de molécules organiques, «cimentent» les sols et permettent sa cohésion.
- les chimistes des sols (bactéries et champignons) contribuent à la dégradation de la matière organique et au recyclage des nutriments.
- les régulateurs des sols qui contribuent au contrôle, notamment par la prédation, des populations d'organismes. Les nématodes, les acariens et les carabes par exemple limitent la prolifération de communautés parfois nuisibles et maintiennent des équilibres dans les sols. Ainsi par exemple, les carabes permettent de réduire les populations de limaces dans les parcelles cultivées.

Tableau 5.1. Abondance et diversité des principaux groupes d'organismes du sol (0-15 cm) sous grandes cultures et prairies dans les sols de Bretagne (adapté de Cluzeau *et al.*, 2011, programme ADEME, RMQS-BioDiv)

Paramètres biologiques	Cultures ¹			Prairies		
	Premier quartile	Troisième quartile	Moyenne	Premier quartile	Troisième quartile	Moyenne
Biomasse microbienne (mg C/g sol)	0,20	0,29	0,25	0,33	0,45	0,43
ADNr 16S (nombre de copies/mg ADN du sol)	25,8	84,1		46,2	156,9	
Abondance des nématodes (ind g ⁻¹ sol sec)	8,8	16	13,2	10,8	29,1	20,6
Diversité taxonomique (nbre de familles) des nématodes	14	17,3		12,8	20,5	
Abondance des acariens (ind/m ²)	1 415	6 013	4756	1 769	9 904	7 835
Abondance des collemboles (ind/m ²)	1 768	14 149	9 810	1 668	14 060	12 103
Diversité taxonomique (nbre d'espèces) des collemboles	1	5		2	5	
Abondance des vers de terre (ind/m ²)	86	320	215	175	447	350
Diversité taxonomique (nbre d'espèces) des vers de terre	6	9		8,5	11	
Abondance de la macrofaune totale du sol (ind/m ²)	167	637	456,6	435	853	678

¹ Le nombre de sites échantillonnés pour calculer ces valeurs est de 52 cultures et 47 prairies (sauf pour les collemboles et acariens où il est de 42 prairies et 47 cultures)

Bien évidemment, les organismes des sols ne peuvent être réduits à une seule de ces catégories, par leur activité ils interagissent entre eux mais également avec le sol et la litière: certains vers de terre par exemple auront une activité fonceuse plus marquée (ex : certains vers anéciques tels que *Lumbricus terrestris*, ou encore les vers endogés tels que *Aporrectodea caliginosa*) alors que d'autres participent plus à la fragmentation de la matière organique (ex : vers épigés tels que *Eisenia fetida*). D'un point de vue fonctionnel, il est donc important de connaître non seulement la diversité des communautés et leur abondance, mais également leurs traits fonctionnels, c'est-à-dire leur biologie (morphologie, physiologie, etc.), leur comportement (alimentaire, fonceur, compétition entre organismes ou mutualisme, etc.) et leurs préférences d'habitat. Cet ensemble d'informations permet de représenter la contribution des organismes du sol au fonctionnement global du milieu et à terme, d'évaluer les services écosystémiques rendus par la biodiversité tellurique.

Cette notion de services écosystémiques s'est imposée suite au Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). Le tableau 5.2 illustre les liens entre les services, le fonctionnement des sols et les organismes biologiques. Bien que présentant une vision utilitaire (voire utilitariste) des écosystèmes, cette notion permet de faciliter la communication vers le public. Il est ainsi plus aisé d'expliquer l'intérêt des galeries verticales des vers de terre pour la régulation des flux d'eau en facilitant son infiltration dans le sol ou la dégradation de la matière organique pour la fourniture de nutriments pour les plantes. En quelque sorte, cela légitime (notamment aux yeux du grand public et des décideurs) l'intérêt de travailler sur ces organismes

Tableau 5.2. Services écosystémiques assurés par les sols en relation avec les processus et les fonctions et exemples d'organismes fournissant ces services (adapté de Haygarth et Ritz, 2009)

	Services écosystémiques	Biens associés, processus et fonctions	Exemples d'organismes
SOUTIEN	Formation des sols	Altération du matériau parental et processus pédogénétiques	Lichens
	Production primaire	Directe : Fixation du carbone Indirecte : Interactions avec les plantes vasculaires	Cyanobactéries
	Cycle du carbone et des éléments nutritifs	Biodégradation de la matière organique Transformations de l'azote et du phosphore	Macrofaune Nombreux protozoaires, nématodes Nombreux bactéries, archées et champignons
APPROVISIONNEMENT	Plate-forme	Stabilité structurale du sol	De nombreux micro-organismes les vers de terre et d'autres organismes de la macrofaune
	Stockage de l'eau	Dynamique de la structure du sol (porosité)	
	Habitat		
	Biodiversité/ressources génétiques	Réservoir de processus d'adaptation et d'évolution Source de nouveaux composés pharmaceutiques	L'ensemble de la biocénose du sol
	Approvisionnement alimentaire	Via la production primaire, champignons comestibles	
REGULATION	Régulation de la qualité de l'eau	Purification via la dynamique de la structure (porosité), la dynamique de la dégradation des xénobiotiques et des agents pathogènes	De nombreux organismes via l'adhésion bactérienne, le pontage fongique, le creusement de galeries et la restructuration du sol...
	Régulation de l'approvisionnement en eau	Dynamique de la structure du sol (porosité)	
	Contrôle de l'érosion	Dynamique de la structure du sol Stabilisation de la structure du sol	
	Régulation biologique	Réseaux trophiques Contrôle des bio-agresseurs : parasitisme et prédation	L'ensemble de la biocénose du sol
	Régulation des gaz atmosphériques et du climat	Régulation des gaz à effet de serre	L'ensemble de la biocénose du sol
	CULTUREL	Cognitif	Via le système-sol qu'il sous-tend Espèces charismatiques
Récratif		Par les terrains sportifs et les espaces verts	
Educatif		Ressources pédagogiques et potentiel	
Santé et bien-être		Liens avec le système-sol dans sa globalité et services	
Patrimoine		Interactions avec l'archéologie	

car bien qu'ayant ou pas une utilité pour l'homme, ces écosystèmes fonctionnent. Quatre types de services fournis par les écosystèmes ont été définis dans le MEA : services d'approvisionnement, services de régulation, services culturels et services de soutien des écosystèmes. Les organismes du sol contribuent à l'ensemble de ces services (bien que la fourniture de services culturels soit beaucoup moins décrite et fasse l'objet de moins de travaux de recherche).

Malgré cette contribution fondamentale au fonctionnement des sols et à la fourniture de nombreux services écosystémiques, les organismes du sol n'ont, jusqu'à une période assez récente, fait l'objet que de peu de travaux. Cependant, depuis environ 20 ans, les progrès réalisés au niveau des méthodes d'analyse et des outils, ont permis de mieux caractériser la biodiversité des sols et de déchiffrer les interactions entre les organismes et leurs implications dans le fonctionnement des sols. Ainsi, sur plusieurs sites expérimentaux comparant différentes pratiques de travail du sol couplées ou non à d'autres pratiques culturales, des analyses et des suivis de la biodiversité et de l'activité des organismes du sol ont été réalisés afin de progresser sur la connaissance des effets du labour et des techniques simplifiées de travail du sol, voire de sa suppression (ex : semis direct).

Les effets du travail du sol sur les organismes vivants dans le sol

Les modifications de propriétés liées au travail du sol à l'origine des effets sur son fonctionnement biologique

Le travail du sol modifie les propriétés structurales du sol, sa porosité et la répartition des matières organiques fraîches restituées ou apportées. Il affecte ainsi les organismes du sol directement en les blessant, les tuant ou en les exposant au risque de prédation (Roger-Estrade *et al.*, 2010) et indirectement en modifiant leur habitat et la localisation des sources d'éléments nutritifs. La diminution de la taille des pores va affecter les organismes en fonction de leur taille. L'existence d'un mulch de débris végétaux en surface va constituer un abri et limiter l'exposition des organismes à la sécheresse. Les conditions d'aération, de température, d'humidité et de pénétration par les racines (Huwe, 2003) qui sont indirectement modifiées par le travail du sol, impactent également les habitats des organismes.

Le travail du sol modifie donc l'écosystème du sol en modifiant la diversité des espèces, leurs abondances et leurs activités (Altieri, 1999), de façon plus ou moins importante selon sa fréquence et son intensité (degré de fragmentation et profondeur de travail). Ces effets sur les organismes vivants du sol se traduisent par des modifications de services écosystémiques (figure 5.1).

Ces changements peuvent être bénéfiques pour la production lorsqu'ils favorisent par exemple le développement d'organismes auxiliaires (e.g. carabes) ou des ingénieurs du sol (e.g. vers de terre) ou néfastes lorsqu'ils provoquent une augmentation des populations de ravageurs (e.g. limaces). Les autres éléments techniques de gestion des systèmes de culture (rotation des cultures, apports de matières organiques, utilisation de pesticides...) peuvent modifier les réponses des organismes

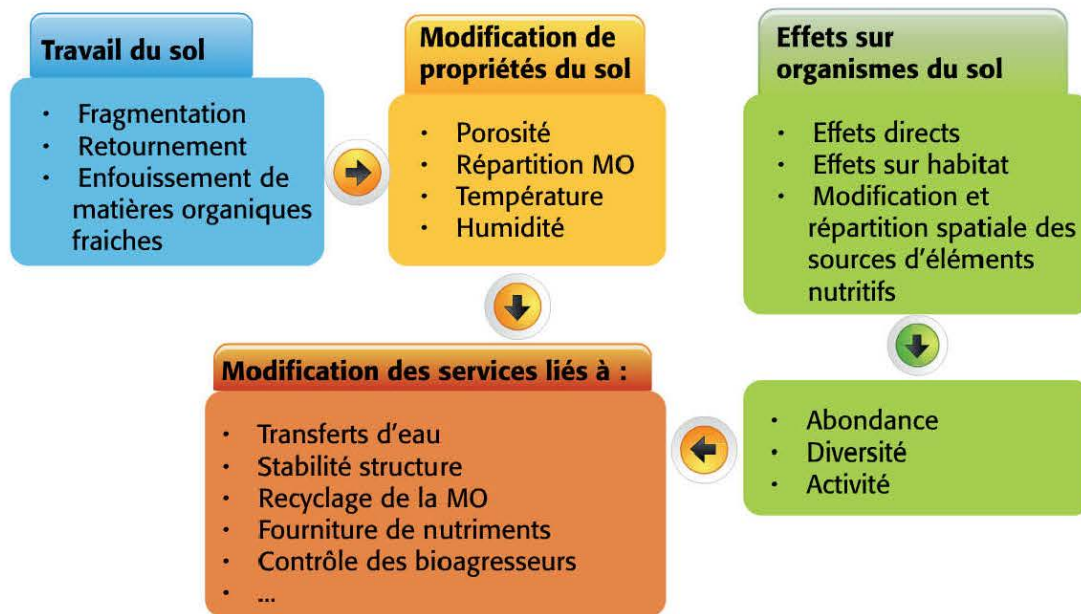


Figure 5.1 : Schéma conceptuel des effets du travail du sol sur les organismes vivants du sol, les fonctions et services écosystémiques.

du sol au travail du sol. Il est toutefois possible de faire ressortir les effets spécifiques du travail du sol sur ces organismes. De nombreuses études montrent qu'en règle générale, une baisse de l'intensité des interventions mécaniques augmente la densité et la diversité des organismes du sol, même si cette réponse peut être très variable selon les espèces considérées (Kladivko, 2001).

Bilan des connaissances sur les effets du travail du sol sur les différents types d'organismes

Travail du sol et micro-organismes du sol

Le travail du sol agit sur l'environnement physique et biotique des micro-organismes du sol et modifie en retour leur abondance, leur diversité et leurs activités au sein du profil de sol.

De nombreuses références sont disponibles sur ce thème et montrent que dans les systèmes non travaillés ou travaillés superficiellement, la quantité et l'activité des micro-organismes du sol présentent une forte stratification verticale tandis qu'elles sont réparties de façon plus homogènes sur la profondeur de la couche de sol labourée (Andrade *et al.*, 2003) (figure 5.2).

La biomasse microbienne est significativement supérieure dans les premiers centimètres du sol (0-10 cm) dans les régimes de travail du sol réduit ou superficiel par rapport aux systèmes labourés et devient inférieure ou égale dans les horizons sous-jacents (Andrade *et al.*, 2003; Wright *et al.*, 2005). En effet, l'enfouissement partiel des résidus de culture dans ces régimes non labourés limite la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol ce qui

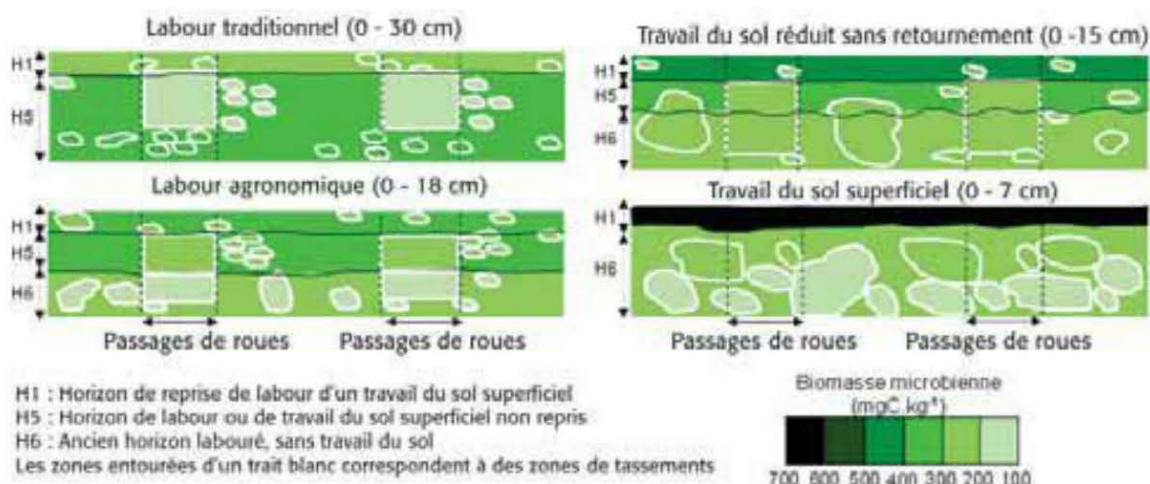


Figure 5.2 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm). Site expérimental de Thil où sont comparées différents régimes de travail du sol en agriculture biologique - ISARA-Lyon (Vian, 2009).

réduit la vitesse de minéralisation de ces résidus (Balesdent *et al.*, 2000). Paradoxalement, la minéralisation du C et N en surface dans les régimes de travail réduit ou superficiel (0-5 à 0-10 cm, selon la profondeur travaillée) est supérieure par rapport aux régimes labourés car ces régimes de travail réduit ou superficiel ont en général une plus grande proportion de matières organiques qui présentent un turn-over plus rapide (Balesdent *et al.*, 2000 ; Oorts, 2006). En revanche, en profondeur, ce rapport s'inverse. Le travail du sol, par l'enfouissement des résidus de cultures, crée des conditions favorables à la croissance microbienne et stimule l'activité de minéralisation des résidus de culture et de la matière organique du sol (Grigera *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003 ; Young et Ritz, 2000). Ainsi, lorsqu'on rapporte les activités de minéralisation du carbone et de l'azote à l'ensemble de la couche de sol, peu ou aucunes différences ne sont observées entre les régimes de travail du sol (Oorts *et al.*, 2007 ; Pekrun *et al.*, 2003). La quantité et l'activité des micro-organismes suivent en règle générale la stratification de la matière organique dans les sols.

Le travail du sol modifie également la structure des communautés microbiennes du sol (Andrade *et al.*, 2003). Dans les systèmes les moins perturbés mécaniquement, l'augmentation de la biomasse microbienne en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique, favorisée par l'humidité du sol (maintenue grâce à la présence d'un mulch) et non affectée par les perturbations mécaniques qui réduisent la longueur des hyphes mycéliens et le nombre de propagules dans les premiers horizons de sol (Spedding *et al.*, 2004). Le type d'outil utilisé pour le travail du sol a également une influence sur les populations microbiennes : il semblerait que les outils animés (herse rotative) aient un effet encore plus délétère pour les populations fongiques qu'un labour (Cookson *et al.*, 2008) car ils seraient plus à même d'entraîner des dommages tissulaires importants sur les communautés fongiques (Helgason *et al.*, 2009). Les sols travaillés intensivement seraient donc dominés par des espèces bactériennes tandis que ceux

dans lesquels le travail du sol est limité favoriseraient le développement de populations fongiques (Kladivko, 2001 ; Young et Ritz, 2000).

Il apparaît également que le travail du sol affecte plus particulièrement certains groupes microbiens, comme les populations nitrifiantes ou les champignons mycorhiziens. Ces derniers sont plus abondants dans les systèmes les moins perturbés (Drijber *et al.*, 2000) et la communauté des bactéries nitrifiantes est plus diversifiée dans les systèmes non travaillés (Ibekwe *et al.*, 2002). Par ailleurs, il semblerait que les systèmes non travaillés favorisent le développement d'espèces anaérobies dans les couches de sol qui ne sont plus fragmentées par les outils (Drijber *et al.*, 2000), tandis que les sols labourés sont dominés par des espèces microbiennes aérobies avec une haute activité métabolique (Spedding *et al.*, 2004). Cependant, l'influence du travail du sol sur la structure des communautés microbiennes est souvent masquée par les variations saisonnières et surtout par l'effet "tampon" de la rhizosphère du sol qui ont en général un effet plus important sur la structure des communautés microbiennes que le travail du sol (Drijber *et al.*, 2000 ; Spedding *et al.*, 2004). Les sols labourés semblent toutefois présenter une diversité génétique microbienne moins importante que les sols non labourés (Drijber *et al.*, 2000 ; Ibekwe *et al.*, 2002).

Travail du sol et micro, méso et macrofaune du sol

Le travail du sol peut également modifier les communautés de la faune du sol, que ce soit la microfaune du sol (protozoaires, nématodes), la mésofaune du sol (acariens, collemboles...) ou encore la macrofaune du sol (vers de terre, carabes, limaces...).

La réduction du travail du sol favorise en général la densité totale des nématodes. Dans certaines situations, et notamment en semis direct sous couvert vivant, on peut observer une augmentation des densités de nématodes phytophages ainsi que des nématodes omnivores et prédateurs. Cependant, d'autres études ont également montré que des systèmes sans labour avec résidus de récolte présentaient des densités de nématodes phytoparasites plus faibles qu'en situation labourée (Govaerts *et al.*, 2006). Le travail du sol conduit souvent à une simplification qualitative de la micro-chaîne trophique du sol (réduction de nombre d'espèces de nématodes). Les systèmes en semis direct présentent une nématofaune plus complexe et moins opportuniste que les systèmes labourés incluant des taxons sensibles aux perturbations, comme les nématodes prédateurs par exemple (Villanave *et al.*, 2009).

Les collemboles, avec les acariens, sont les microarthropodes les plus abondants des sols (100 000 individus/m²) (Coleman *et al.*, 2004). À l'heure actuelle, seules 6 000 espèces de microarthropodes sont connues (Jeffery *et al.*, 2010). Les acariens se rencontrent majoritairement au sein des matières organiques du sol en décomposition (Coleman *et al.*, 2004). Ils peuvent être détritivores (se nourrissent de matière organique en décomposition, présente de manière importante dans les litières), prédateurs (arthropodes, micro-organismes...) ou parasites des végétaux. Les collemboles, quant à eux, sont stratifiés par espèces au sein du profil de sol et peuvent se retrouver jusqu'à 1,50 m de profondeur (Jeffery *et al.*, 2010). Cepen-

dant, ils semblent plus importants dans les 30 premiers centimètres du sol, notamment dans la rhizosphère (Coleman *et al.*, 2004).

Le labour semble affecter les microarthropodes du sol par une perturbation physique du sol (mortalité lors du labour, emprisonnement des organismes dans des mottes de terres, modifications du régime hydrique et de la température du sol) et par l'enfouissement des résidus de cultures (perte en surface) (Kladivko, 2001). Toutefois, les réponses des populations de microarthropodes au travail du sol sont plus variées et plus extrêmes suivant les groupes auxquels ils appartiennent. Par exemple, les différents groupes taxonomiques d'acariens semblent répondre différemment aux effets du labour conventionnel. Une étude conduite sur 3 ans par l'Acta a comparé le nombre moyen de microarthropodes, dont les acariens, dans des parcelles labourées et non labourées. Cette étude a mis en évidence que les populations d'acariens oribates et mésostigmates semblaient être modérément à extrêmement inhibées par le labour conventionnel, comparé au non-labour. Il semblerait que l'accumulation de débris végétaux à la surface des sols (dû au non-labour) favorise leur expansion (Chabert, [sd]). La réponse au travail du sol des autres populations d'acariens est plus nuancée. Les astigmates sont soit inhibés, soit stimulés par le labour. Ils semblent se remettre beaucoup plus rapidement des effets d'un labour. Cela est dû à une stratégie de reproduction rapide, ils peuvent alors coloniser intensément toutes les niches devenues disponibles. Cette même étude a également montré que les populations de microarthropodes étaient plus importantes au sein de la rhizosphère des parcelles non labourées par rapport aux parcelles labourées. Les collembolles, quant à eux, sont généralement inhibés par le labour conventionnel (Kladivko, 2001) de façon plus ou moins forte selon leur habitat (profondeur).

L'abondance des microarthropodes semble donc être affectée par l'enfouissement des résidus de culture et une perturbation physique du sol. Le non-labour tend à rendre les sols plus stables et à favoriser le développement des décomposeurs des sols, notamment en surface du sol, là où les résidus de cultures s'accumulent (Coleman *et al.*, 2004).

Les enchytréides (petits annélides), qui ont un rôle semblable à celui des vers de terre mais à plus petite échelle (van Vliet *et al.*, 1993), présentent une réponse relativement contrastée au travail du sol. Certains auteurs trouvent une diminution de l'abondance des enchytréides en parcelles non labourées (van Capelle *et al.*, 2012). Les auteurs expliquent eux-mêmes que cela contredit l'hypothèse communément acceptée selon laquelle ces organismes ne seraient pas affectés par le travail du sol, en raison de leur petite taille et de leur rapidité de reproduction (Didden *et al.*, 1994). Cependant, un effet positif de l'arrêt du travail du sol est mis en évidence par d'autres auteurs (Parmelee *et al.*, 1980 ; Fujita et Fujiyama, 2001 ; Miura *et al.*, 2008), principalement dans les premiers centimètres de sol. La distribution verticale des enchytréides dépend en effet pour beaucoup de la disponibilité en matière organique. Ils sont donc généralement localisés dans les 5 premiers centimètres de sol en non-labour et sur les 20 premiers centimètres en parcelles labourées (van Vliet *et al.*, 1997). Les enchytréides peuvent ne pas être affectés directement par le travail du sol, mais bénéficier de la dynamique positive d'un autre groupe (eg vers

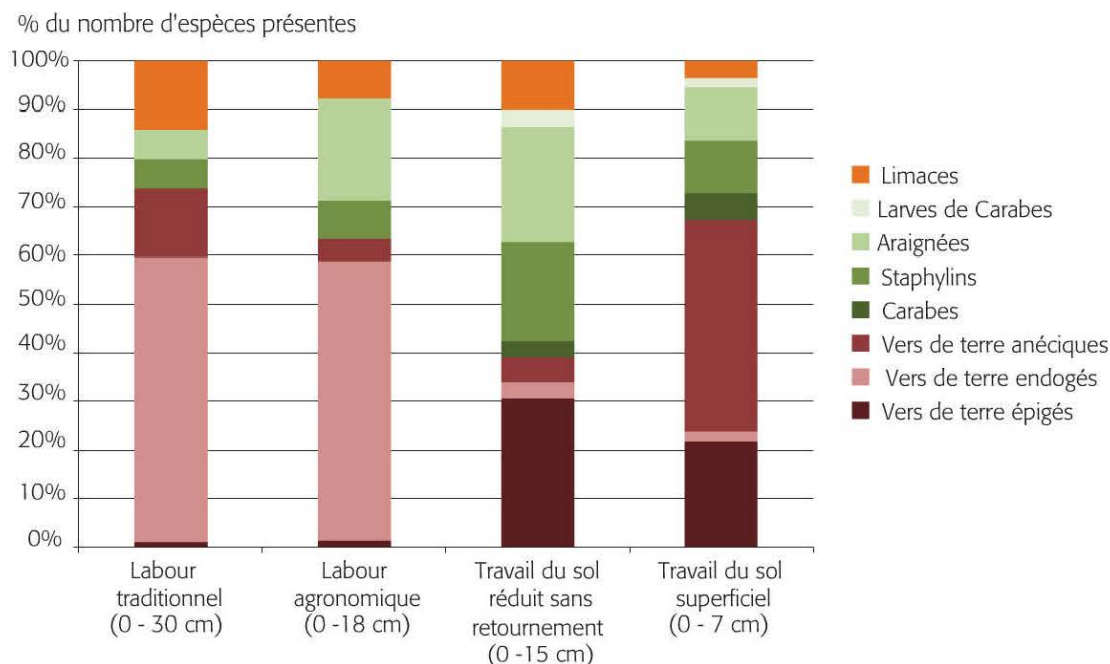


Figure 5.3 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur l'importance relative (%) de quelques groupes de la faune du sol. Site expérimental de Thil où sont comparées différentes méthodes de travail du sol en agriculture biologique - ISARA-Lyon. Programme Bioindicateurs 2 de l'ADEME (Vian, 2011).

de terre) suite à la modification du travail du sol et ce par différents mécanismes pas uniquement trophiques. Les enchytréides restent cependant assez peu étudiés comparativement aux autres groupes de la faune du sol, certainement en raison de la difficulté d'identification des individus à l'espèce.

La diminution de l'intensité du travail du sol favorise en général le développement de la macrofaune du sol qui semble plus affectée par le travail du sol que les organismes de plus petite taille. Les perturbations physiques et la diminution du mulch à la surface du sol limitent en général le développement de la macrofaune du sol (Kladivko, 2001) (figure 5.3).

Cependant, la réponse de la macrofaune au travail du sol est très dépendante des espèces présentes, notamment en ce qui concerne la faune épigée, souvent composée d'auxiliaires des cultures (carabes, staphylins et araignées). Par exemple la revue bibliographique de Holland et Reynolds (2003) montre une plus grande abondance et une plus grande diversité de carabes dans les parcelles conduites en non-labour, mais les travaux de Holland et Luff (2000) montrent que cette réponse est variable selon les espèces. Ces derniers auteurs dénombrent ainsi que sur 47 espèces de carabes étudiées, 21 sont fortement inhibées par le labour, 20 sont plus abondantes en labour et six ne semblent pas perturbées par le type et l'intensité de travail du sol. Les staphylins, en revanche, semblent moins sensibles au travail du sol que les carabes, à l'inverse des araignées, dont la densité et la diversité de population augmentent dans les parcelles non labourées (Holland et Reynolds, 2003). Cependant, la présence d'un mulch en surface en agriculture de conser-

vation procure également un habitat propice car protecteur pour les ravageurs des cultures et notamment pour les limaces (Peigné *et al.*, 2007). Ainsi, Glenn et Symondson (2003) ont montré que les dégâts occasionnés par les limaces sur les cultures augmentent dans les parcelles non labourées.

L'effet du labour sur les vers de terre a été largement étudié. En général, la biomasse et l'activité des vers de terre augmentent dans les systèmes de conservation par rapport aux systèmes labourés. Le labour peut détruire l'habitat des vers de terre, notamment des espèces anéciques, et les expose aux prédateurs et à la dessiccation. De plus, l'augmentation des résidus de cultures en surface constitue une réserve trophique pour certaines espèces de vers de terre et stimule leur activité fouisseuse (Kladivko, 2001; Peigné *et al.*, 2007). Le nombre de biopores verticaux est donc favorisé par l'absence de travail du sol et peut atténuer à long terme l'effet de l'absence de fragmentation des anciennes couches de sol labourées. Les vers de terres épigés qui vivent à la surface du sol sont quasiment absents des parcelles cultivées. Le labour, par l'enfouissement des résidus de culture peut expliquer cette absence, tout comme l'utilisation de produits phytosanitaires (Pelosi *et al.*, 2013). Les vers de terre endogés ne semblent pas être affectés par le labour (figure 5.3) et peuvent même être favorisés par l'enfouissement des résidus de culture (Pelosi *et al.*, 2009).

Les effets du travail du sol se conjuguent avec ceux d'autres pratiques culturales associées

Travail du sol couplé à différents types de fertilisation, organique ou minérale

Le contexte expérimental

Dans un contexte breton, où les surfaces conduites en techniques culturales sans labour (intégrant les absences occasionnelles de labour) ont atteint 26 % des surfaces régionales d'après les enquêtes «Techniques culturales » de 2011 (Terrat, 2014), la gestion des effluents d'élevage est une problématique qui vient s'ajouter à l'effet des pratiques sans labour. Ainsi, afin de répondre aux questionnements des agriculteurs sur les effets de la réduction du travail du sol et de la fertilisation, tant sur les propriétés du sol que sur le comportement des cultures, la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne a mis en place en 2000 l'essai agronomique de Kerguéhennec, sur la commune de Bignan (Morbihan). Cet essai permet de comparer 3 techniques de travail du sol (L : labour à 25 cm, TS : travail superficiel réalisé au chisel à 8 cm de profondeur sans retournement, SD : semis direct) associées à différents types de fertilisation (M : engrais minéral, FB/CM : fumier de bovins apporté tous les 4 ans en alternance avec une fertilisation minérale, FV : fumier de volailles, LP : lisier de porcs, ces deux dernières fertilisations étant complétées par des apports d'engrais azotés minéraux permettant de compenser leur déficit en azote). Cet essai est conduit sur une rotation sur 4 ans (maïs-blé-colza-blé). Un grand nombre de paramètres sont régulièrement mesurés sur ce dispositif dont les abondances des communautés lombriciennes.

Le travail du sol : un impact négatif sur les lombriciens peut être compensé par une fertilisation organique

Les résultats, obtenus après 7 ans d'étude, montrent que les épigés, petits vers de surface, sont quasiment absents quel que soit le traitement, corroborant les résultats régulièrement trouvés en système cultivé qui soulignent la forte sensibilité de ces individus aux pratiques agricoles (figure 5.4) (Pérès *et al.*, 2011). Sous fertilisation minérale, la réduction du travail du sol favorise de manière significative les abondances lombriciennes, et particulièrement sous semis direct. Cet effet positif est d'autant plus notable pour les anéciques, individus de grande taille menacés tant par l'action de la charrue que par la destruction annuelle de leur habitat (Rovira *et al.*, 1987 ; Lee and Foster, 1991 ; Pérès *et al.*, 2011). Sous fertilisation organique, la réponse biologique à la réduction du travail du sol est variable, soulignant les fortes interactions entre les facteurs mécaniques et chimiques. Les apports de fumier de bovin tous les quatre ans en alternance avec une fertilisation minérale ne favorisent pas le développement des communautés lombriciennes, que ce soit en labour ou en travail superficiel. Les apports annuels de lisier de porcs et de fumier de volailles permettent le développement des lombriciens et particulièrement des endogés, quel que soit le travail du sol : ces individus, qui vivent dans le sol (Bouché, 1972), bénéficieraient de la matière organique enfouie dans le sol par les actions mécaniques (labour et travail du sol superficiel) (Chan, 2001) ou biologiques (action des anéciques) (Lowe and Butt, 2003). Il apparaît donc que l'action mécanique liée à la réduction du travail du sol impacte la structure des communautés en favorisant les anéciques, d'un point de vue fonctionnel, cela aboutira à la formation de galeries verticales et à la production de turricules qui vont contribuer respectivement à améliorer la capacité d'infiltration (Bouché and Al-Assan, 1997 ; Shipitalo and Butt, 1999) et à réduire la vitesse de ruissellement et l'érosion (Le Bayon and Binet, 2001 ; Jouquet *et al.*, 2008). L'action

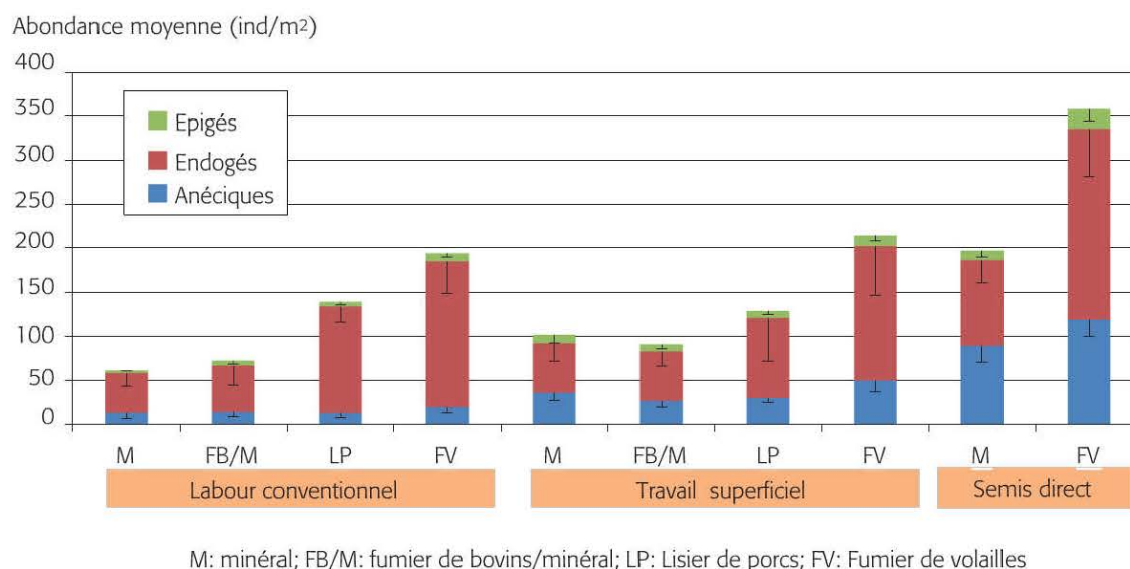


Figure 5.4 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol croisés à différents types de fertilisation, sur l'abondance et la structure fonctionnelle des lombriciens (Piron *et al.*, 2014).

fertilisante liée aux apports organiques va, quant à elle, bénéficier aux endogés, ce qui devrait permettre d'améliorer la structure grumeleuse du sol et ainsi potentiellement la capacité de rétention en eau (Pérès *et al.*, 1998 ; Ehlers, 1975) et la stabilité structurale des sols (Bouché et Al-Addan, 1997). Ces actions sur les propriétés physiques du sol contribuent au service écosystémique de type régulation hydrique (Blouin *et al.*, 2013). La réduction du travail du sol apparaît donc comme un élément majeur de la restauration des communautés lombriciennes, mais elle doit se réfléchir conjointement avec les apports organiques (qualité des apports, fréquence des apports) qui sont tout aussi importants dans le fonctionnement du sol.

Travail du sol couplé à la mise en place de couverts végétaux en période d'interculture

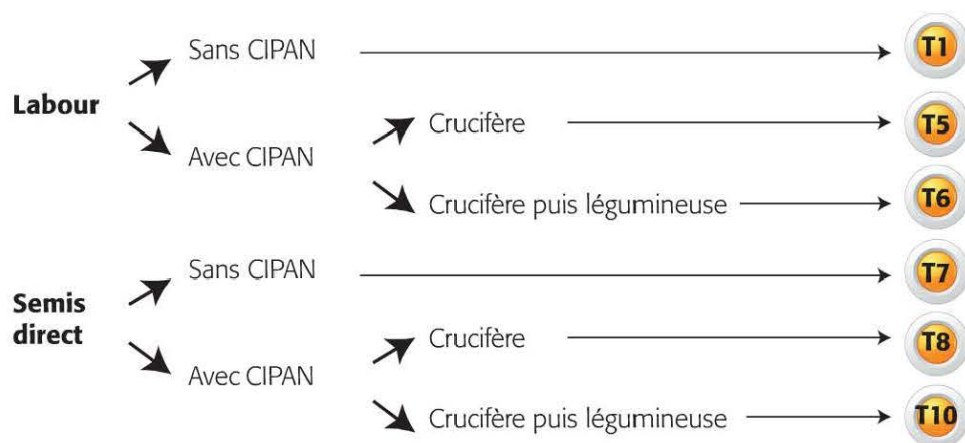
Le contexte expérimental

L'impact du travail du sol sur l'abondance et la diversité des communautés microbiennes a été évalué sur l'essai « environnement » d'Arvalis, implanté sur la ferme de Boigneville (Essonnes) depuis 1991. Ce site a été mis en place pour comparer le labour au semis direct et étudier les impacts de l'implantation de cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN). Pour cette étude¹, des outils issus de la biologie moléculaire et de la métagénomique environnementale, basés sur l'extraction et la caractérisation de l'ADN des sols, ont été appliqués afin de caractériser l'abondance et la diversité microbienne des sols (Maron *et al.*, 2011).

L'essai environnement compare un système avec travail du sol conventionnel tous les ans (labour à 23 cm de profondeur) et un système en semis direct sans travail du sol. Une rotation de cultures a été instaurée dès la mise en place de l'essai : pois de printemps (*Pisum sativum*), blé d'hiver (*Triticum aestivum*) et orge de printemps (*Hordeum vulgare*). Une culture intermédiaire de moutarde (*Sinapis alba*) a été introduite pendant l'interculture entre l'orge de printemps et le pois, entre le blé et l'orge de printemps, et entre le pois et le blé pour la moitié des parcelles. Depuis l'été 2006, des changements ont été réalisés pour la moitié des traitements avec culture intermédiaire, la moutarde a été remplacée par la lentille (*Lens nigricans*), une légumineuse. Depuis l'été 2010, les derniers traitements avec la moutarde en tant que culture intermédiaire ont été remplacés par des traitements avec une autre crucifère, le radis chinois (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*). Depuis 2012, le pois de printemps a été remplacé, dans la rotation, par la féverole d'hiver (*Vicia faba*).

Parmi les traitements existants, 6 ont été choisis pour notre étude : T1, T5, T6, T7, T8 et T10 (figure 5.5). De plus, des échantillons de sol nu (SN) ont également été prélevés entre les parcelles à trois endroits différents de l'essai (zones en marge des parcelles expérimentales, maintenues en sol nu par un entretien chimique avec du glyphosate).

1. Réalisée dans le cadre du programme SolAgri 2011-12 cofinancé par France AgriMer et le GIS GC HP2E



CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrate

Figure 5.5 : Description simplifiée des différents traitements retenus pour l'essai environnemental.

Les prélèvements de sols ont été réalisés sur l'horizon 0-20 cm. Huit prélèvements ont été effectués entre mai 2011 et juillet 2012 afin d'étudier en parallèle la variabilité temporelle des analyses microbiologiques des sols.

Les communautés bactériennes et fongiques ont été caractérisées par des outils de biologie moléculaire relevant de la métagénomique environnementale. L'abondance microbienne a ainsi été appréhendée par la mesure de la quantité d'ADN extrait des sols (Biomasse moléculaire microbienne, Dequiedt *et al.*, 2011) et la diversité a été mesurée par le séquençage massif des séquences taxonomiques microbiennes, directement à partir de l'ADN extrait du sol (Terrat *et al.*, 2012). Ces approches permettent d'estimer avec robustesse le nombre d'espèces (richesse) et l'équilibre entre les espèces microbiennes (équitabilité). Ces séquences sont analysées par des outils de bioinformatiques et de biostatistiques pour déduire des indices de diversité (comme l'indice de Shannon, qui intègre la richesse en espèces et l'équitabilité entre les espèces). De plus, grâce aux bases de données internationales il est maintenant possible d'identifier taxonomiquement les espèces présentes et donc d'appréhender la composition microbienne d'un sol et sa qualité (Maron *et al.*, 2011).

Le travail du sol : un impact négatif et stable sur la biomasse moléculaire microbienne qui peut être compensé par les cultures intermédiaires.

La biomasse moléculaire microbienne a été mesurée sur toutes les modalités étudiées et à huit dates de mai 2011 à juillet 2012. La figure 5.6 représente les mesures de biomasse cumulées et moyennées pour toutes les dates étudiées et pour chacune des pratiques appliquées.

Les résultats montrent que la biomasse microbienne la plus faible est trouvée dans le sol maintenu nu depuis 20 ans. Ceci corrobore l'hypothèse selon laquelle l'absence de couvert végétal sur un sol entraîne une baisse significative de la vie du sol et donc de la biomasse microbienne. La comparaison des modalités de travail du sol révèle une biomasse microbienne significativement plus faible dans le labour (environ 25 %) en comparaison du semis direct (T5 vs T7). Ceci confirme

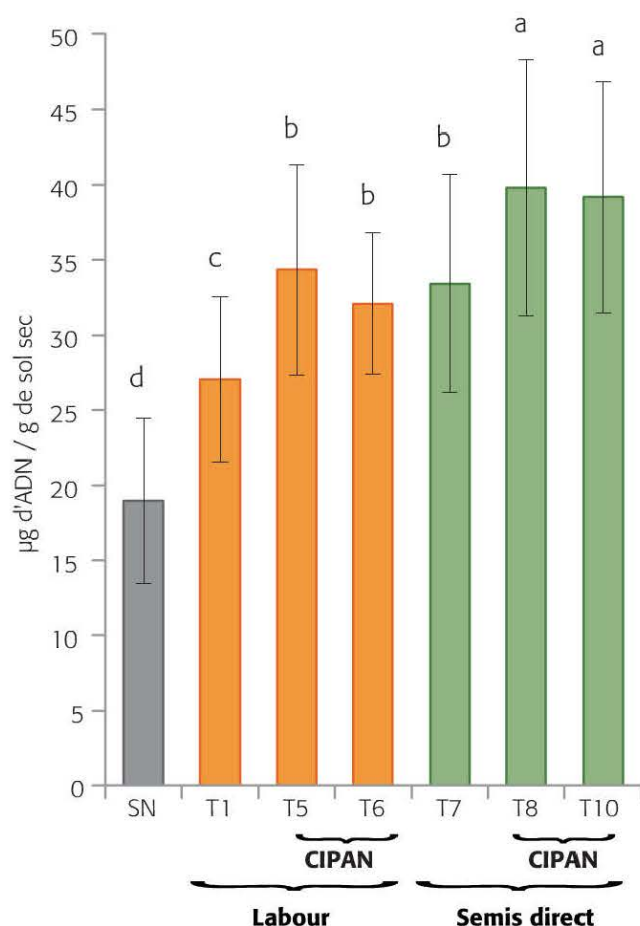


Figure 5.6 : Mesure de la biomasse moléculaire microbienne dans l'horizon 0-20 cm du site de Boigneville selon différentes pratiques agricoles (sol nu vs travail du sol vs semis direct, avec et sans culture intermédiaire piège à nitrate - CIPAN).

l'effet négatif du travail du sol sur l'abondance des micro-organismes. Ceci peut s'expliquer notamment par une altération des habitats microbiens (notamment les macroagrégats qui représentent des habitats pour les champignons) et/ou du statut trophique du sol (teneur et qualité de la matière organique).

La présence de cultures intermédiaires stimule la biomasse microbienne (+25 %) de façon significative, pour les deux modalités de travail du sol. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle l'implantation répétée de couverts végétaux entretient une vie microbienne plus importante. De plus, il est intéressant de noter que la stimulation de la biomasse microbienne par les cultures intermédiaires est observée quelle que soit la date d'échantillonnage et donc même à des périodes de l'année où les cultures intermédiaires sont absentes. Il est donc possible de déduire que l'effet cumulé des cultures intermédiaires depuis 20 ans stimule la biomasse microbienne de façon pérenne.

Une analyse détaillée de la biomasse microbienne pour chaque modalité et à toutes les dates échantillonnées montre que, malgré des petites variations saisonnières de la biomasse microbienne (+/- 15 %), les écarts entre traitements sont conservés dans le temps. Ceci confirme donc que la biomasse microbienne est un indicateur robuste et applicable tout au long de l'année pour détecter l'impact des pratiques agricoles sur les communautés microbiennes du sol.

Impact différentiel du travail du sol sur la diversité des bactéries et des champignons

La comparaison de la diversité microbienne entre les modalités de travail du sol (figure 5.7) révèle une plus grande diversité bactérienne en labour et une plus grande diversité de champignons en non-labour. Cette réponse différentielle de la diversité bactérienne et de champignons au travail du sol peut s'expliquer notamment par des sensibilités différentes à cette pratique. Les champignons sont connus pour être sensibles aux agressions physiques du labour. En effet, cette technique peut altérer directement l'intégrité de leur mycélium mais aussi modifier l'état structural du sol et notamment mener à la destruction des macroagrégats qui représentent leur habitat physique dans le sol. Le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons. Pour les bactéries, le fait qu'elles soient plus résistantes aux perturbations mécaniques (car plus petites et unicellulaires) et majoritairement localisées dans les microagrégats (qui restent intègres même après un labour), permet d'émettre l'hypothèse que le labour représente, non pas une perturbation forte comme pour les champignons, mais une perturbation intermédiaire (ou moyenne). D'après le postulat écologique selon lequel la diversité d'une communauté est maximum pour une perturbation intermédiaire et minimum pour une perturbation forte (par sélection) ou faible (par exclusion compétitive) (Giller *et al.*, 1978), le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons et intermédiaire pour les bactéries. À l'inverse et selon le même postulat, le semis direct représente une perturbation intermédiaire pour les champignons (synonyme de forte diversité) et faible pour les bactéries (synonyme de faible diversité).

Effet sur la qualité de la composition des communautés microbiennes

Sur l'essai environnement de Boigneville, l'analyse des compositions microbiennes met en évidence la stimulation de certaines populations au détriment d'autres, sous la modalité travail du sol. Par exemple, le labour stimule des taxons bacté-

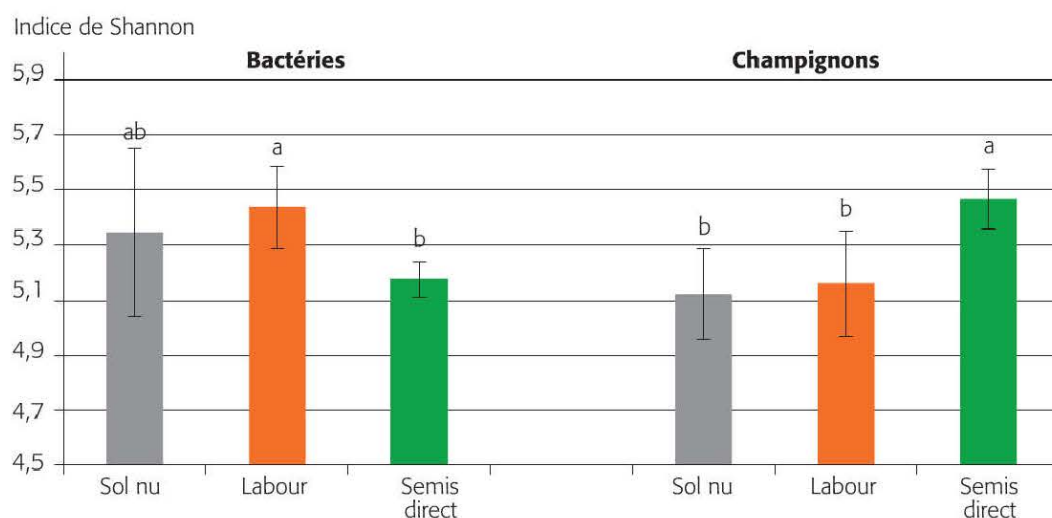


Figure 5.7 : Mesure de la diversité des communautés de bactéries et de champignons (Indice de Shannon) dans les sols (horizon 0-20 cm) soumis aux pratiques agricoles du site de Boigneville (sol nu, travail du sol et semi- direct).

riens de type Protéobactéries (genres *Massilia*, *Naxibacter*...), connues pour être résistantes aux environnements perturbés et de type copiotrophes stratégies type r (favorisées par un environnement riche en matières organiques fraîches). Ces attributs écologiques indiquent qu'elles sont capables de se développer rapidement et de dégrader activement la matière organique fraîche facilement dégradable.

À l'inverse, le semis direct stimule des populations de types *Actinobacteria*, indicatrices d'environnements stables. Ces bactéries sont copiotrophes stratégies type k. Elles sont donc aussi fortement impliquées dans la dégradation de la matière organique mais de façon plus progressive que les stratégies r. Des bactéries du genre *Nitrospira* sont aussi préférentiellement stimulées par le semis direct. Ces bactéries sont connues pour être assez sensibles aux perturbations et surtout fortement impliquées dans le cycle de l'azote.

Pour les champignons, le labour entraîne une augmentation des *Basidiomycota* qui sont impliqués dans la dégradation de la matière récalcitrante alors que le semis direct favorise les champignons de type *Ascomycota* qui dégradent la matière organique fraîche peu récalcitrante.

L'analyse des compositions taxonomiques et des attributs écologiques et fonctionnels associés permet de conclure que le labour stimule des populations bactériennes opportunistes résistantes aux perturbations et qui vont consommer rapidement la matière organique fraîche apportée au sol (résidus ou amendements). Il en résulte que les champignons ont moins accès à ce type de matière organique d'où le développement de populations qui sont plus adaptées à dégrader de la matière organique récalcitrante comme la matière organique du sol (plus ou moins stabilisée). En semis direct, la répartition entre les populations bactériennes et fongiques est plus équilibrée quant à leur capacité de dégradation de la matière organique fraîche, ce qui peut engendrer une fourniture en éléments minéraux à la plante, issue de la dégradation de la matière organique, plus progressive tout au long du cycle de développement de la culture.

Travail du sol couplé à des rotations

Le contexte expérimental

Des expérimentations *in situ* ont été menées dans les années 1990 en France afin d'évaluer les effets des systèmes de cultures sur la faune du sol. Un essai a ainsi été mis en œuvre à Courseulles-sur-mer (Calvados) de 1989 à 1998 sur un sol limoneux profond à pH eau voisin de 7, afin de comparer les effets des pratiques agricoles en systèmes conventionnels par rapport à des systèmes intégrés (qu'on appellerait aujourd'hui raisonnés). Ces systèmes intégrés comportaient notamment, dans la plupart des cas, un travail du sol superficiel et moins d'intrants phytosanitaires et de fertilisants (Cortet *et al.*, 2002).

Un effet du travail du sol sur les microarthropodes variable selon la rotation culturale

Un des résultats majeurs observés sur ce site pour les communautés de microarthropodes concerne l'effet de la rotation. En effet, le type de culture mis en place à un moment donné induit de fait un certain nombre d'interventions culturales propres à cette culture mais qui peuvent être également modifiées par le précédent cultural, ce qui peut conduire à des états du sol différents sous une même culture en lien avec le précédent cultural. Ainsi, une parcelle cultivée en blé au moment de l'échantillonnage, dont le précédent cultural était du lin, avait été cultivée de façon très différenciée entre le système conventionnel et le système intégré, avec notamment un labour profond en conventionnel et un travail superficiel en intégré. Sur cette parcelle, la biodiversité des microarthropodes du sol (abondance, richesse) était supérieure en intégré par rapport au conventionnel. En revanche, une parcelle cultivée en blé au moment de l'échantillonnage, différenciée en terme de travail du sol de façon similaire à l'autre parcelle, mais dont le précédent cultural était de la betterave, ne présentait pas les mêmes résultats. Les abondances étaient équivalentes en intégré et en conventionnel.

Ces résultats sont confirmés par ailleurs pour les microarthropodes du sol. Ainsi Dekkers *et al.* (1994), qui ont comparé différents systèmes de gestion des cultures (conventionnel, intégré et biologique), concluent que les principaux facteurs permettant d'expliquer la répartition des microarthropodes sont le type de culture, son stade de développement, la date d'échantillonnage, le système de culture, ainsi que l'humidité du sol corrélée à la porosité. Dans le sud de la Suède, il a été rencontré des populations plus abondantes d'acariens et de collemboles dans des systèmes de culture comprenant une rotation blé/pois/orge/avoine ou colza/blé/avoine/orge/blé par rapport à des monocultures d'orge ou d'avoine (Andrén et Lagerlof, 1983). Jagers op Akkerhuis *et al.* (1988) ont montré que les populations de microarthropodes étaient différentes selon les types de cultures : les céréales sembleraient plus favorables aux microarthropodes que les betteraves sucrières, les pois ou le chanvre. Les cultures à tubercules, comme les pommes de terre ou les betteraves sucrières seraient particulièrement défavorables aux microarthropodes, car elles n'apporteraient pas une couverture végétale suffisante au sol, ne permettraient pas un apport permanent de matière organique fraîche et nécessiteraient un travail du sol plus profond.

Travail du sol associé à la rotation, au couvert et à la réduction des intrants chimiques

Le contexte expérimental

Le site expérimental de La Cage à Versailles (Yvelines) a été mis en place en 1998 pour évaluer les performances et les impacts de différents systèmes de culture dans le contexte d'agriculture du grand Bassin parisien, caractérisé par des rotations courtes, une forte proportion de blé (un an sur deux) et une absence d'élevage, donc de fertilisants organiques. Le sol est un luvisol profond (classification FAO), développé sur des limons.

Cet essai compare trois systèmes de culture qui diffèrent principalement par le travail du sol, les rotations de culture et les apports de pesticides et de fertilisants (Pelosi *et al.*, 2009). Le système conventionnel est fondé sur la recherche du maximum de production par hectare, ce qui nécessite l'utilisation de variétés très productives et un niveau élevé d'intrants fertilisants et phytosanitaires. Ces hauts niveaux de production sont censés garantir la rentabilité économique. Ce système est proche de la pratique actuelle dominante dans la région. Le système biologique satisfait le cahier des charges de l'agriculture biologique, qui interdit l'emploi d'intrants chimiques de synthèse. Dans le cas présent, l'absence de fertilisation organique oblige à introduire des légumineuses dans la succession pour assurer une fourniture d'azote aux autres cultures. Le système sous couvert végétal (SCV) est basé sur la suppression du travail du sol et le maintien d'une plante de couverture, y compris pendant le cycle de la culture principale. Il est représentatif de l'agriculture de conservation.

L'essai est divisé en six parcelles d'un hectare, correspondant à deux réplicats de chacun des trois systèmes de culture. Chaque parcelle est elle-même divisée en deux sous-parcelles. Les rotations ont été instaurées de manière à ce que, chaque année, l'une des deux sous-parcelles soit en blé d'hiver.

Le semis sous-couvert vivant : un système qui permet d'accroître significativement la biodiversité des sols

Sur ce site, Henneron *et al.* (2014) se sont intéressés aux communautés de micro-organismes, de nématodes et d'invertébrés de la macrofaune du sol, y compris les vers de terre, dans les trois systèmes de culture après 14 ans de différenciation de l'essai, au printemps 2011. Les communautés microbiennes ont été analysées grâce à des techniques de biologie moléculaire. La nématofaune et la macrofaune ont été analysées et classifiées en groupes fonctionnels.

Les abondances et les biomasses des organismes étudiés sont supérieures dans les systèmes sous couvert végétal et biologique par rapport au système intensif, excepté pour les nématodes prédateurs (figure 5.8a). L'abondance de la macrofaune est par exemple respectivement supérieure de 100 à 2 500 %, celle des nématodes de 100 à 700 % et celle des micro-organismes de 30 à 70 % dans les deux systèmes alternatifs comparés au système conventionnel. La réponse est plus marquée pour la macrofaune et les nématodes que pour les micro-organismes. Le système en agriculture de conservation (SCV) présente, de manière générale, des augmentations plus marquées que le système biologique. Les bactéries, les champignons, les vers de terre anéciques (créant un réseau de galeries verticales ou sub-verticales connectées à la surface) ainsi que les arthropodes phytophages et rhizophages sont par exemple plus nombreux en système sous couvert végétal qu'en conventionnel (figure 5.8a). L'abondance de tous les types de nématodes est augmentée, excepté celle des carnivores. Les nématodes libres, bénéfiques pour le fonctionnement du sol, mais également les nématodes parasites des plantes cultivées, sont plus nombreux sous couvert végétal.

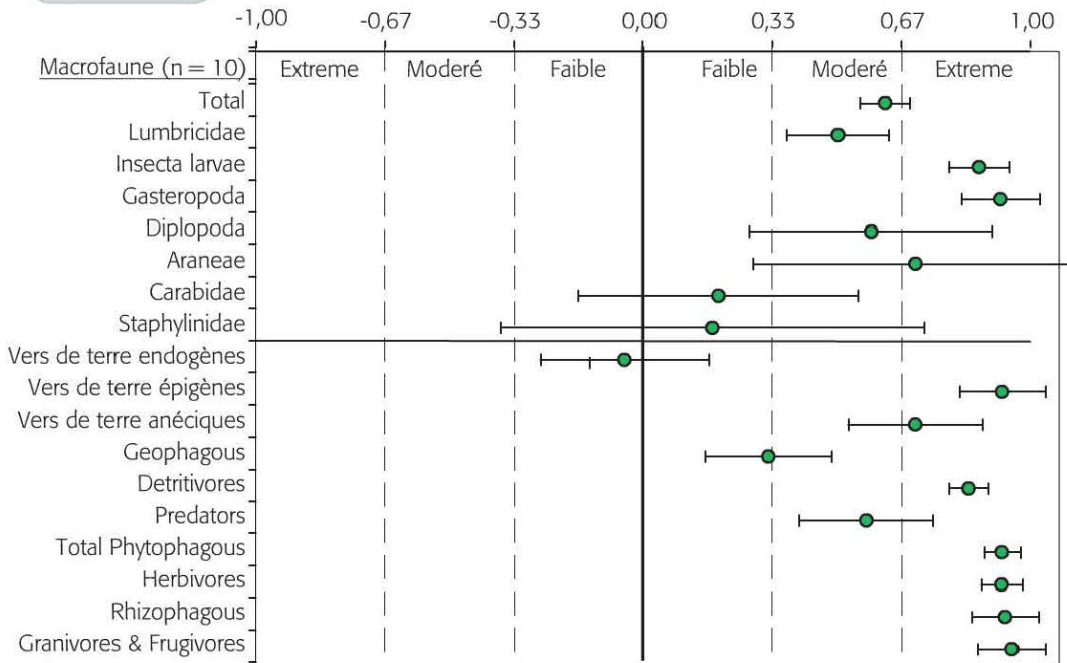
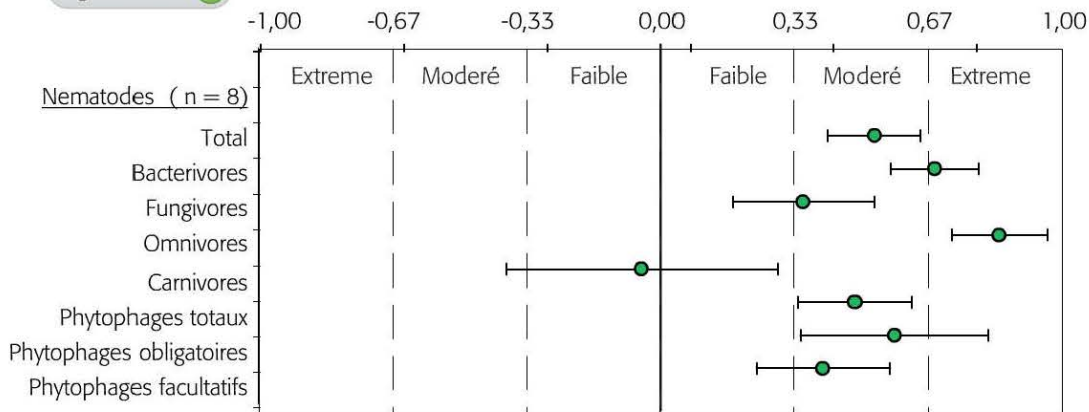
Figure 5.8 a**Figure 5.8 b**

Figure 5.8 : Indice représentant le niveau de réponse du système sous couvert végétal par rapport au conventionnel pour l'abondance de différents groupes taxonomiques et fonctionnels de la faune du sol sur l'essai de La Cage, a) macrofaune et b) nématofaune (moyenne $\pm$ intervalle de confiance à 95 %) (d'après Henneron *et al.*, 2014).

Ces travaux mettent en évidence un effet positif sur les organismes du sol des systèmes de culture alternatifs, et principalement de l'agriculture de conservation, par rapport au système intensif, actuellement le plus souvent pratiqué dans le Bassin parisien. La modification des communautés d'organismes du sol pourrait avoir des conséquences sur le fonctionnement et les performances de l'agrosystème dans son ensemble.

Conclusion

L'étude des effets de pratiques culturales telles que le travail du sol sur les organismes vivants du sol est complexe compte tenu des nombreuses interactions et de la variabilité de ces effets dans l'espace et dans le temps. Ils doivent donc être étudiés jusqu'à des échelles assez fines (profil cultural) et sur des périodes de temps suffisamment longues pour prendre en compte les capacités d'adaptation de certains organismes aux changements.

D'après les résultats exposés issus de plusieurs expérimentations réalisées en France, la réduction, voire l'abandon du travail du sol a, le plus souvent, un effet positif sur l'abondance, l'activité et la diversité des organismes du sol, en lien avec une perturbation moindre de leurs habitats et de leurs ressources nutritives. Néanmoins les effets observés ne peuvent pas lui être exclusivement attribués car il a été le plus souvent étudié conjointement à d'autres pratiques culturales (rotations, mise en place de couverts végétaux, niveaux d'intensification, type de fertilisation) dans le cadre de comparaison de systèmes de culture dont il était une des composantes. Ainsi comme le montrent les résultats de l'essai de La Cage, les systèmes d'agriculture de conservation qui combinent la mise en œuvre du semis direct, de rotations longues et d'une couverture végétale permanente, montrent les effets les plus marqués.

Cependant et contrairement à ce qui est véhiculé très souvent, les résultats des expérimentations montrent que le labour ne « tue » pas les sols et ses effets négatifs sont atténués s'il est couplé à des pratiques d'entretien organique du sol, de rotation des cultures, d'utilisation d'engrais verts, couverts végétaux et de réduction des produits phytosanitaires. À l'opposé, les systèmes en agriculture de conservation demandent une maîtrise technique et des connaissances pratiques et écologiques poussées pour produire les effets attendus.

Si les conclusions, issues de ces différents sites permettent de mieux comprendre l'impact du travail du sol mais plus généralement des systèmes de culture sur le fonctionnement biologique des sols agricoles, d'autres travaux sont nécessaires pour augmenter la généricité de ces résultats tels que :

- mettre en place d'autres sites étudiant le travail du sol sous d'autres pédo-climats (Lienhard *et al.*, 2014) en lien avec différents systèmes de culture,
- étudier la grande diversité de types de travail du sol et identifier les plus adaptées au maintien du patrimoine biologique du sol,
- augmenter les échelles d'investigation et travailler dans des paysages agricoles et/ou via des réseaux d'exploitations agricoles,
- coupler les mesures de diversité à des mesures de fonctionnement biologique du sol (minéralisation de la matière organique du sol, infiltration de l'eau par exemple).

Par ailleurs, sur la base des résultats présentés, les indicateurs suivants pourraient être recommandés pour suivre la transition entre différents systèmes de culture ou les piloter : abondance et diversité des communautés lombiciennes, de nématodes et de micro-organismes (bactéries et champignons). Ce groupe d'indicateurs repose sur trois outils pour lesquels des protocoles, des références et des

laboratoires existent (<http://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/>). D'autres indicateurs informatifs tels que les microarthropodes ou la macrofaune totale (ex : carabes) pourraient également être ajoutés mais manquent encore de prestataires.

Les conséquences des modifications du fonctionnement biologique du sol sur les services écosystémiques rendus (structuration du sol, recyclage nutriments, transformation de la matière organique) ont été peu abordées hormis les effets de certains groupes écologiques de vers de terre sur le maintien de la structure et la création de porosité. Elles nécessitent d'évaluer simultanément les modifications des propriétés physiques et chimiques des sols, vu les fortes interactions entre ces trois composantes afin de faire le lien entre la composante biologique (abondance, diversité, activité) et le fonctionnement des sols.

Références bibliographiques

- Andrade D.S., Colozzi-Filho A. et Giller K.E., 2003. The Soil Microbial Community and Soil Tillage, p. 51-81, *In A. El Titi, ed. Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton.*
- Balesdent J., Chenu C. et Balabane M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53:215-230.
- Bouché M.B., 1972. Contribution à l'approche méthodologique de l'étude des biocénoses. *Ann. Zool. Ecol. Anim.*, 4 (4): 529-536.
- Bouché M.B., Al-Addan F., 1997. Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 441-452.
- Chabert A., [sd]. Utilisation d'indicateurs biologiques pour l'analyse de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement - (dossier 99/19 - Diagnostic environnemental et indicateurs biologiques). *Projet pilote conduit par l'ACTA. Montluel*, 152p.
- Chan K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57, 179-191.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63-72.
- Coleman DC., Crossley DA., Hendrix PF., 2004. Fundamentals of Soil Ecology 2nd edition. Academic Press. USA : *Elsevier Science & Technology Books*, 2004, 408p. ISBN: 978-0-12-179726-3.
- Cookson W.R., Murphy D.V., et Roper M.M., 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 40:763-777.
- Dance, A. 2008. Soil ecology: What lies beneath. *Nature*, 455(7214), 724.
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. 2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, S23-S38.
- Decaëns, T., 2010. Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and Biogeography*, 19(3), 287-302.

- Dequiedt S., Saby N., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., and Ranjard L., 2011. Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. *Global Ecology and Biogeography* 20: 641-652.
- Diden W.A.M., Marinissen J.C.Y., Vreeken-Buijs M.J., Burgers S.L., Geurs M., Brussaard L., Soil meso- and macro-fauna in two agricultural systems: factors affecting population dynamics and evaluation of their role in carbon and nitrogen dynamics, *Agric. Ecosyst. Environ.* 51, 171-186 (1994).
- Djigal D., Saj S., Rabary B., Blanchart E., Villenave C., 2012. Mulch type affects soil biological functioning and crop yield of conservation agriculture systems in a long-term experiment in Madagascar. *Soil and Tillage Research* 118, 11-21
- Drijber R.A., Doran J.W., Parkhurst A.M., et Lyon D.J., . 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry* 32.
- Ehlers W.M., 1975. Observation of earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 119 (3): 242-249.
- Fujita M., Fujiyama S., 2001. Comparison of soil fauna (oribatids and enchytraeids) between conventional and organic (tillage and no-tillage practices) farming crop fields in Japan. *Pedosphere* 11, 11-20.
- Giller K.E., Witter E., McGrath S.P., 1998 Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biol Biochem* 30:1389-1414
- Glen D.M., Symondson W.O.C., 2003. Influence of soil tillage on slugs and their natural enemies. In: El Titi A. (ed.): *Soil tillage in agroecosystems*, CRC Press, Boca Raton, pp. 207-227.
- Govaerts B., Sayre K., Deckers J., 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till Res* 87, 163-174.
- Grigera, M.S., Drijber, R.A., et Wienhold B.J., 2007. Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research* 94:550-554.
- Haygarth et Ritz, 2009. The future of soils and land use in the UK : soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*. 26 : S187-S197
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pélosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., Girardin C., Blanchart E. (2014) Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for sustainable development*. DOI 10.1007/s13593-014-0215-8
- Helgason B.L., Walley F.L., Germida J.J., 2009. Fungal and bacterial abundance in long-term no-till and intensive-till soils of the northern great plains. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 120-127.
- Holland J.M. & Luff M.L., 2000. The effects of agricultural practices on Carabidae in temperate agroecosystems. *Integrated Pest Management Reviews*, 5, 109-129
- Holland et Reynolds, 2003. The impact of soil cultivation on arthropod (Coleoptera and Araneae) emergence on arable land. *Pedobiologia*, Volume 47, Issue 2, pp. 181-191.
- Ibekwe A.M., Kennedy A.C., Frohne P.S., Papiernik S.K., Yang C.-H. et D.E. Crowley. 2002. Microbial diversity along a transect of agronomic zones. *FEMS Microbiology Ecology* 39:183-191.

Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J. et Van Der Putten W. H. (eds.), 2010, Atlas européen de la biodiversité du sol. Commission européenne, *Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg*. 130p. ISBN 978-92-79-29726-7

Jouquet P., Podwojewski P., Bottinelli N., Mathieu J., Ricoy M., Orange D., et al . 2008. Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. *Catena*, 74, 13–21.

Kladivko E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research* 61:61-76.

Le Bayon R.C. & Binet F. 2001. Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorus transfer in a temperate maize crop. *Pedobiologia*, 45, 430–442.

Lee K.E., Foster R.C., 1991. Soil fauna and soil structure. *Austr. J. Soil Res.*, 29:745-775.

Lowe C.N., Butt K.R., 2003. Influence of food particle size on inter- and intra-specific interactions of *Allolobophora chlorotica* (Savigny) and *Lumbricus terrestris*. *Pedobiologia* 47, 574-577.

Maron P.A, Mougel C, Ranjard L., 2011. Soil microbial diversity: spatial overview, driving factors and functional interest. *CRAS Biology II*. 334:403-411.

Millennium ecosystem assessment synthesis report. *Millennium Ecosystem Assessment*, 2005

Miura F., Nakamoto T., Kaneda S., Okano S., Nakajima M., Murakami T., 2008. Dynamics of soil biota at different depths under two contrasting tillage practices. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 406-414.

Oorts K., 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France. *PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris*.

Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J. et David C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23:129-144.

Peigné J., Cannavacciuolo M., Gautronneau Y., Aveline A., Cluzeau D., 2009. Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil Till. Res.* 104, 207-214.

Pekrun, C., Kaul, H.P., et W. Claupein. 2003. Soil tillage for sustainable nutrient management, p. 83-113, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.

Parmelee R.W., Beare M.H., Cheng W., Hendrix P.F., Rider S.J., Crossley D.A., Coleman D.C., 1990. Earthworms and enchytraeids in conventional and no-tillage agroecosystems: a biocide approach to assess their role in organic matter breakdown. *Biology and Fertility of Soils* 10, 1-10.

Pelosi C., Toutous L., Chiron F., Dubs F., Hedde M., Muratet A., Ponge J.-F., Salmon S., Makowski D., 2013. Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181, 223-230.

Pelosi C., Bertrand M., Roger-Estrade J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 287-295.

Pérès G., Cluzeau D., Curmi P., Hallaire V., 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biol. Fert. Soils* 27, 247-424.

- Pèrès G., Vandenbulcke F., Guernion M., Hedde M., Beguiristain T., Douay F., Houot S., Piron D., Rougé L., Bispo A., Grand C., Galsomies L., Cluzeau D., 2011. The use of earthworms as tool for soil monitoring, characterization and risk assessment. Example of a Bioindicator Programme developed at National scale (France) *Pedobiologia* 54:77–87.
- Rovira A.D., Smettem K.R.J., Lee K.E., 1987. Effect of Rotation and Conservation Tillage on Earthworms in a Red-brown Earth under Wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38: 829-834.
- Shipitalo, M.J. & Butt K.R., 1999. Occupancy and geometrical properties of *Lumbricus terrestris* L. burrows affecting infiltration. *Pedobiologia*, 43, 782–794.
- Spedding T.A., Hamel C., Mehuys G.R. et Madramootoo C.A., 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36:499-512.
- Tebrügge F., Düring R.A., 1999 – Reducing tillage intensity, a review of results from a long term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53: 15-28.
- Terrat S., 2014. “Entre agroécologie et nouvelles technologies. *L'innovation en agronomie*. N° 435-436. 28 pages.
- Terrat S., Christen R., Dequiedt S., Lelievre M., Nowak V., Bachar D., Plassart P., Wincker P., Jolivet C., Bispo A., Lemanceau P., Maron P.A., Mougel C., and Ranjard L. *. 2012. Molecular biomass and MetaTaxogenomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure, *Microbial Biotechnology* 5:135-141.
- Van Capelle C., Schrader S., Brunotte J., 2012. Tillage-induced changes in the functional 610 diversity of soil biota – A review with a focus on German data. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 611 165-181.
- Van Vliet P.C.J., West L.T., Hendrix P.F., Coleman D.C., 1993. The influence of *Enchytraeidae* (*Oligochaeta*) on the soil porosity of small microcosms, *Geoderma* 56, 287-299
- VanVliet P.C.J., Coleman, D.C., Hendrix, P.F., 1997. Population dynamics of *Enchytraeidae* (*Oligochaeta*) in different agricultural systems. *Biology and Fertility of Soils* 25, 123-129.
- Vian J.F., 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les micro-organismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. *PhD thesis, ISARA-Lyon, AgroParisTech*, 171p.
- Vian J.F et Peigné J., 2012. Influence du travail du sol sur différents bioindicateurs du sol. Résultats des mesures des Bioindicateurs sur le site de Thil. *Programme Bioindicateurs de la qualité des sols, phase II – ADEME*. 78p.
- Villenave C., Ba A.O., Rabary B., 2009. Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nematofaune: semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). *Etude et gestion des sols* 16, 369-378.
- Wright A.L., Hons F.M., Matocha J., John E., 2005. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. *Applied Soil Ecology* 29:85-92.
- Young I.M. et Ritz. K., 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53:201-213.

6

Travail du sol et gestion de la flore adventice

N. COLBACH, C. VACHER

Depuis le début de l'agriculture, l'un des objectifs importants du travail du sol a été le contrôle des adventices ou « mauvaises herbes » (Mazoyer et Roudart, 1997), même si ce rôle est passé au second plan avec l'apparition des herbicides de synthèse. À ce jour, les adventices sont considérées comme le bioagresseur le plus nuisible, causant des pertes de rendement substantielles et des problèmes techniques à la récolte (e.g. Oerke, 2006) et les herbicides constituent aujourd'hui la majorité des pesticides consommés en grandes cultures (Ecophyto R&D¹). Ces derniers sont à l'origine de problèmes environnementaux (pollution des eaux, www.ifen.fr) et sanitaires très importants (Waggoner *et al.*, 2013).

Avec l'extension très importante des surfaces cultivées en non-labour que l'on observe depuis le début des années 2000 (Holland, 2004), les conditions de gestion mécanique des adventices ont profondément changé. Cependant, l'abandon du labour s'accompagne globalement d'une augmentation de l'enherbement des parcelles. Le changement de système de travail du sol a aussi pour effet de modifier la composition spécifique de la communauté des adventices. Ces problèmes de gestion de flore ont contribué au développement de l'emploi de variétés tolérantes à des herbicides non sélectifs (Darmency *et al.*, 2011) qui simplifient l'utilisation des produits chimiques. Dans le contexte actuel de réduction de l'emploi des herbicides, que ce soit au plan national avec le plan Ecophyto ou au plan européen (directive européenne 2009/128, programme Reach²), le rôle du travail du sol dans la gestion des adventices revient au premier plan, même si ce n'est qu'un levier technique dans l'arsenal des moyens mobilisables (choix de la rotation, utilisation de plantes de couverture,...).

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser les connaissances sur les effets du travail du sol sur les adventices, en faisant le point sur quelques pratiques particulières, le faux semis, la simplification et l'abandon du travail du sol.

1. <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/EcophytoRD-8pages-VFweb3.pdf>

2. http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm

Les adventices, une composante biotique diverse et variable

Un bioagresseur très nuisible

Les adventices sont toutes les plantes non semées par l'agriculteur dans le champ cultivé, comprenant aussi bien des espèces sauvages (par exemple vulpin, folle-avoine, renouée...) que des repousses de plantes cultivées. Les adventices sont considérées comme le bioagresseur le plus nuisible parce qu'elles sont en compétition avec les cultures pour la lumière, l'eau et les nutriments et peuvent donc, si elles ne sont pas suffisamment contrôlées, être à l'origine de pertes de rendement conséquentes (Oerke, 2006). Elles peuvent aussi rendre difficile la récolte, en diminuant la qualité (présence de semences adventices dans les récoltes, modifications des teneurs en acides gras des récoltes de colza par des semences de repousses d'autres variétés) ou propager d'autres bioagresseurs (Froment *et al.*, 2013 ; Wisler et Norris, 2005). Même à faible densité, les adventices peuvent être nuisibles, en produisant des semences qui peuvent survivre pendant plusieurs années dans le champ cultivé (Gardarin *et al.*, 2010b) et qui sont ainsi à l'origine d'infestations dans les cultures suivantes (Jordan, 1992).

Un pilier de la biodiversité

Les adventices sont aussi un des piliers de la biodiversité. Elles constituent l'essentiel de la biodiversité végétale dans les paysages agricoles (Petit *et al.*, 2011) et contribuent à nourrir de nombreux organismes phytophages (insectes, oiseaux, mammifères...) (Marshall *et al.*, 2003). Les adventices pourraient même contribuer à réguler d'autres bioagresseurs, en hébergeant ou nourrissant des auxiliaires des cultures ou en étant des plantes pièges ou perturbatrices pour les ravageurs (Altieri et Whitcomb, 1980).

Une grande diversité fonctionnelle

Les adventices annuelles se reproduisent et se dispersent par des semences produites ; certaines espèces n'ont qu'un cycle de reproduction par an, d'autres en accumulent plusieurs dans une même année. À l'autre extrême, les espèces pérennes se reproduisent essentiellement par multiplication végétative (rhizomes, stolons...).

En fonction des systèmes de culture et des conditions de milieu, la flore adventice d'un champ est composée de dizaines voire de centaines d'espèces différentes ayant des exigences, des comportements et des conséquences agronomiques extrêmement variables (Fried *et al.*, 2008). S'y ajoutent la variabilité intra-spécifique, notamment due à la tolérance d'une part croissante des populations adventices aux herbicides (Délye *et al.*, 2013), et aussi la présence de cohortes de plantes levant à différents mois ou même saisons.

Une diversité de processus liés au travail du sol

En l'absence de travail du sol, les semences adventices sont majoritairement présentes à proximité de la surface du sol (Bàrberi et Lo Cascio, 2001). Les semences non dormantes germent puis lèvent, avec des processus de mortalité entre germination et levée (figure 6.1). Les semences dormantes et les semences profondes germent et lèvent mal (Bàrberi et Lo Cascio, 2001; Gardarin *et al.*, 2010a) et constituent le stock semencier qui peut survivre pendant plusieurs années (Gardarin *et al.*, 2010b). Enfin, des organismes granivores (oiseaux, carabes,...) se nourrissent des semences de surface et contribuent à réduire le stock semencier.

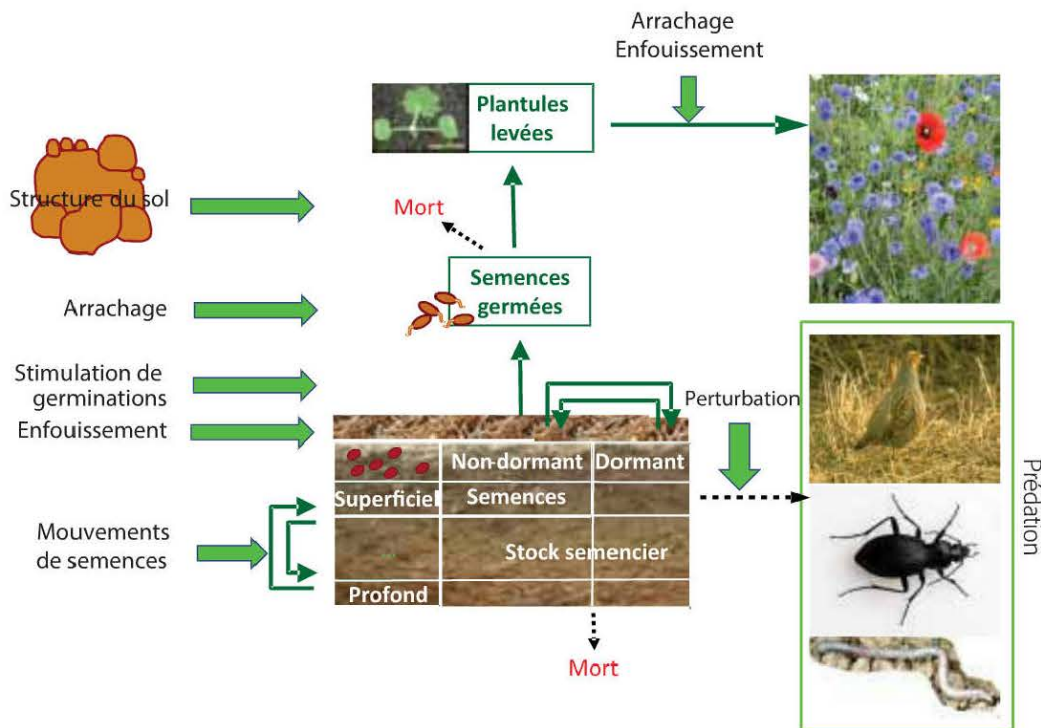


Figure 6.1. Représentation schématique des effets majeurs du travail du sol sur les différents stades des adventices (© Nathalie Colbach 2014)

Le travail du sol agit sur plusieurs processus :

- amélioration du contact terre-graine des semences à la surface du sol, facilitant l'imbibition et la germination de certaines semences adventices ;
- enfouissement et remontée des semences ;
- enfouissement des matières organiques et résidus de culture, facilitant ainsi la levée mais améliorant l'effet de certains herbicides ;
- levée de dormances et stimulation de germinations ;
- perturbation de la prédation ;
- fragmentation du sol et donc réduction de la mortalité pré-levée ;
- arrachage des plantules avant et après la levée et recouvrement de terre.

L'importance des différents effets dépend de l'outil de travail du sol, de la profondeur de travail, de la vitesse du tracteur, de l'humidité du sol, et de l'espèce et du stade des adventices. En fonction de son objectif (stimuler des germinations fatales des semences adventices, inhiber leur levée, détruire des plantes levées), le travail du sol tentera de jouer sur différents processus. Le faux semis (voir ci-dessous)

tentera de stimuler un maximum de germination pour réduire le stock semencier présent au semis de la culture de rente, et ce à un moment où les adventices résultantes pourront être détruites avant ce semis. Cependant, il affectera aussi d'autres processus. Il pourra ainsi enfouir les semences trop profondément et ainsi gêner leur germination. L'objectif du travail avant le semis de la culture de rente sera de nettoyer le champ des adventices levées pendant l'interculture et d'enfouir un maximum de semences à une profondeur où elles ne germeront ou ne lèveront plus. Cependant, il pourra aussi stimuler des germinations et causer des levées adventices dans la culture de rente.

Les effets dépendront fortement des espèces adventices présentes dans le champ. Réduire la levée en enfouissant les semences ne sera efficace que pour des espèces à petites semences (figure 6.2) comme la matricaire dont l'embryon et les réserves ne peuvent produire que des petits hypocotyles en l'absence de lumière, pendant la croissance dans le sol (Gardarin *et al.*, 2010a). À l'opposé, des espèces à grandes semences comme la folle-avoine peuvent lever à partir de semences enfouies à 30 cm.

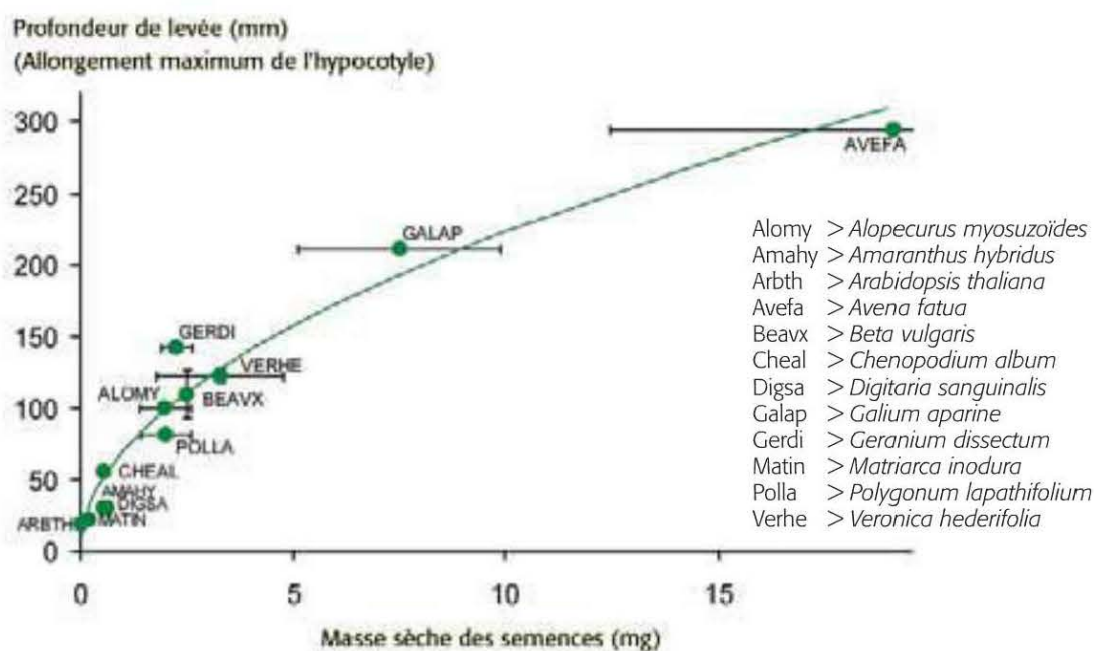


Figure 6.2. Diversité de la réponse des adventices au travail du sol. Exemple de la profondeur de levée dépendant de la taille des semences adventices (basé sur Gardarin *et al.*, 2010a).

L'indispensable faux semis

Éviter d'enfouir les semences

Le faux semis est tout travail du sol superficiel pendant l'interculture contribuant à vider le stock semencier adventice, en favorisant des germinations de semences à un moment où les plantes résultantes ne sont pas nuisibles pour la culture. Le travail du sol estival permet effectivement d'augmenter les levées adventices, mais son efficacité dépend non seulement de l'espèce adventice et de l'année, mais aussi

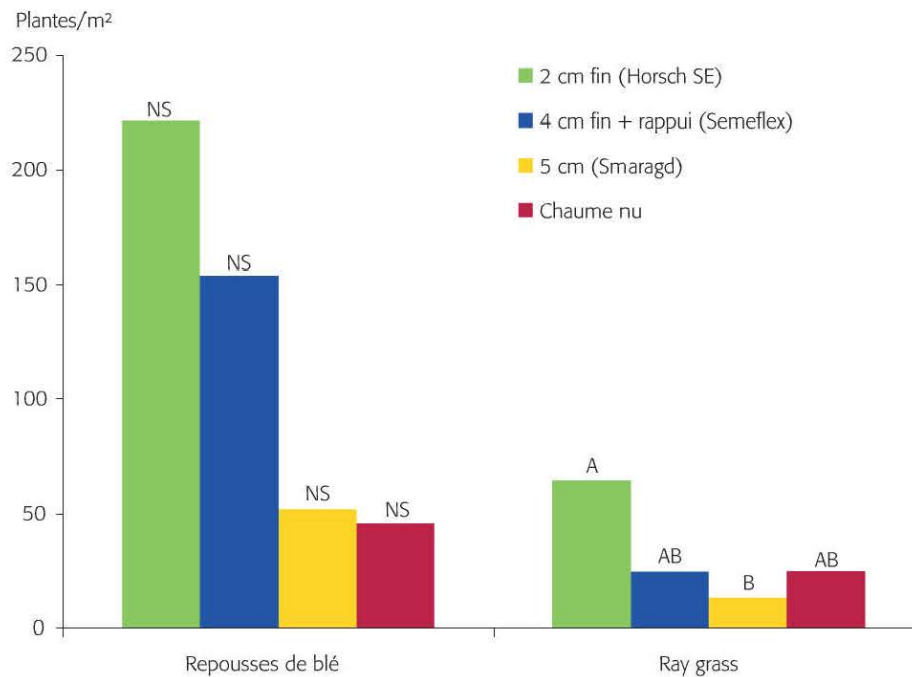


Figure 6.3. Effet de différents types de travail du sol estival (été 2007) sur la levée d'adventices en interculture à Boigneville. Comptage réalisé 4 semaines après le travail du sol ; seules les adventices présentes à plus de 5 plantes/m² dans tous les blocs ont été analysées. Les densités avec la même lettre ne sont pas significativement différentes à 5 % (d'après Bonin et Labreuche, 2007).

de l'outil employé et de la profondeur de travail (figure 6.3), à cause des effets sur la structure du sol et sur la position des semences (figure 6.4). Un outil à dents qui fragmente peu le sol produira un profil avec des mottes proches de la surface et un mélange de terre fine et de semences en profondeur, donc une situation où les adventices ont plus de mal à germer et à lever. Un outil à disques à forte fragmentation produira un mélange plus uniforme de terre fine et de semences sur la profondeur travaillée, avec des semences proches de la surface, en condition idéale pour germer. En conclusion, pour être efficace, le faux semis doit être superficiel, fin et rappuyé.

Laisser les semences s'imbiber avant de travailler

Les essais au champ comme les suivis effectués à Boigneville (figure 6.3) évaluent l'effet du faux semis en notant les levées adventices peu après le travail du sol. Or, ce type d'évaluation ne permet pas de juger de toute l'efficacité du faux semis car les semences germées ne se traduisent pas toujours par des levées visibles au moment de la notation, soit parce que celle-ci est effectuée trop tôt, soit parce que les plantules meurent avant de lever. De plus, le faux semis peut aussi protéger les semences de la germination fatale et de la prédation, en enfouissant les semences.

Des comptages de semences adventices dans le sol et des suivis de levées dans les cultures suivant des faux semis ont confirmé l'efficacité de cette technique qui permet à la fois de réduire le stock semencier et les levées adventices pendant les

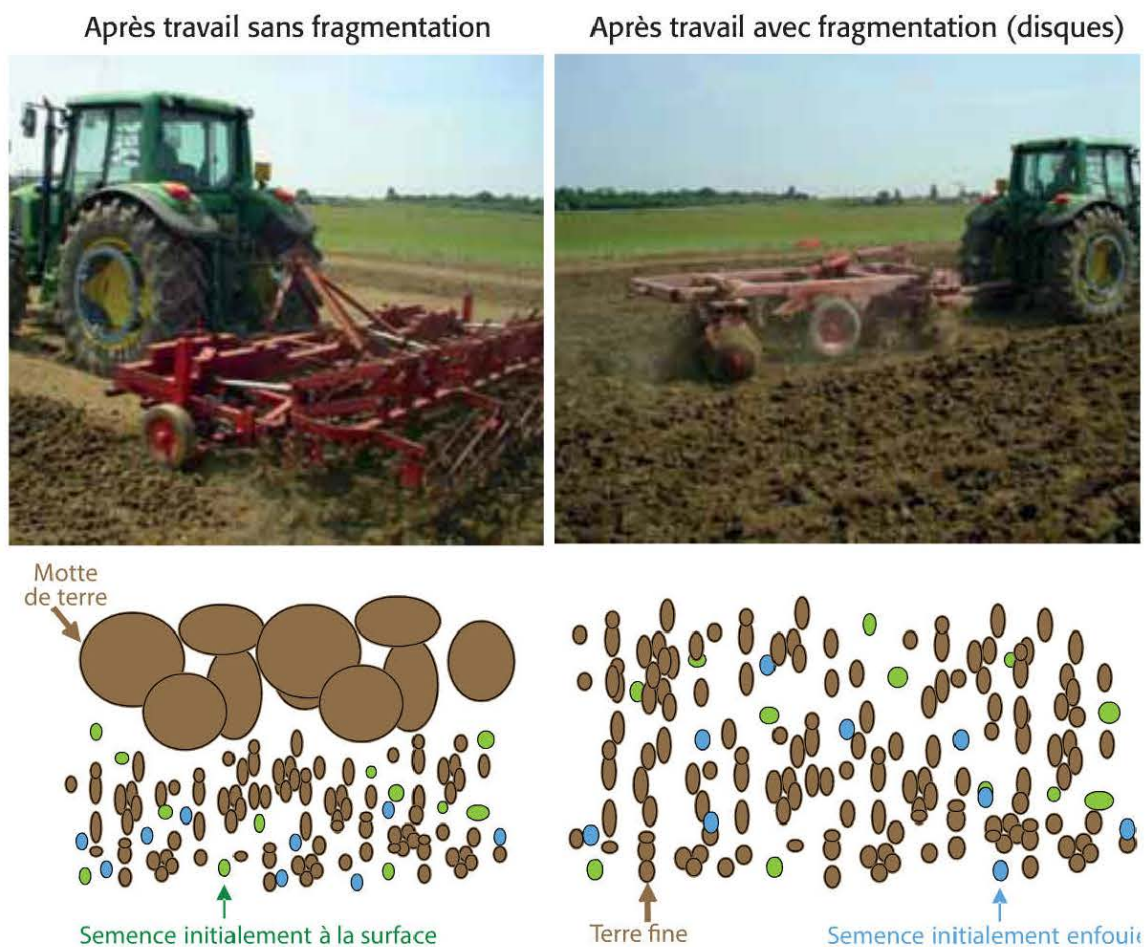


Figure 6.4. Effet du travail du sol sur la position des semences d'adventices (basé sur Colbach *et al.*, 2014a) (schémas : © Nathalie Colbach 2014 ; photos : © Hugues Busset 2006)

deux années suivantes (figure 6.5). Cet essai montre cependant que le facteur majeur n'est pas le nombre de faux semis, mais le temps écoulé entre la récolte du précédent (et donc la pluie) et le premier faux semis. En effet, de nombreuses semences adventices ont besoin d'une activation d'un phytochrome par la lumière pour devenir sensibles aux stimuli environnementaux (pluie, travail du sol) déclenchant la germination, et cette photo-activation n'est possible que si les semences sont imbibées. Pour réunir ces conditions, il vaut mieux retarder le premier faux semis après les premières pluies pour permettre l'imbibition et la photo-activation des semences (ex. vulpin, Colbach et Mézière, 2013). Dans le cas contraire, le faux semis peut même induire des dormances et ainsi contribuer à l'augmentation du stock semencier.

L'abandon du labour

Une tendance à l'augmentation de l'enherbement

Le labour avec une charrue à versoirs est l'outil le plus efficace pour enfouir les semences, même si son effet varie considérablement avec la profondeur de travail, la présence éventuelle d'une rasette et la structure du sol (figure 6.6). En cas

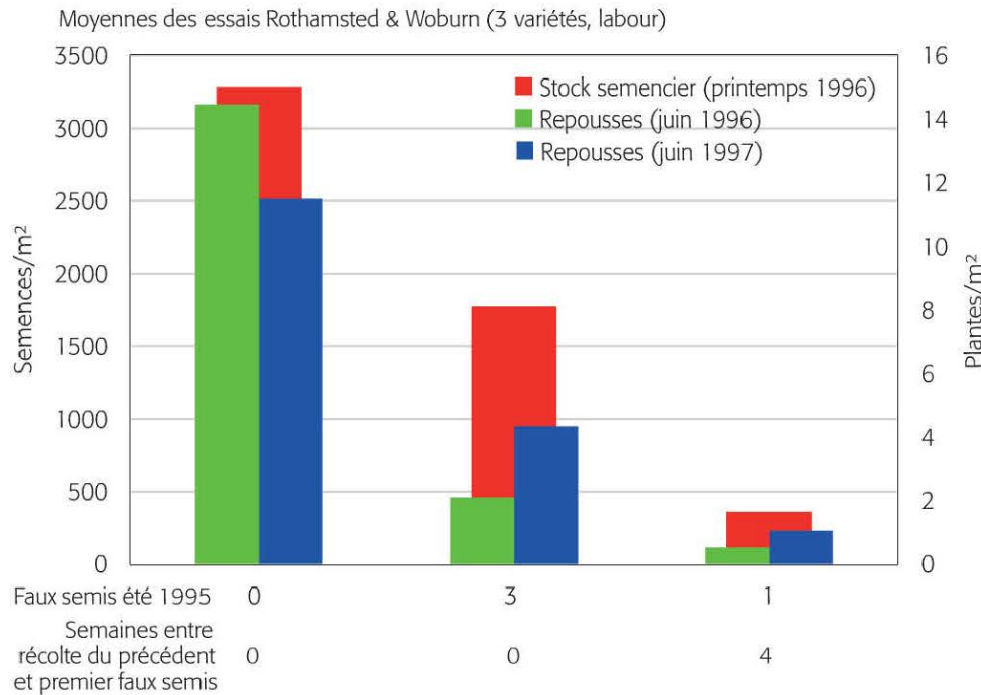


Figure 6.5. Effet du faux semis sur le stock semencier adventice au printemps suivant, ainsi que sur les levées adventices pendant les deux cultures suivantes, avec l'exemple des repousses de colza (d'après Pekrun et Lutman, 1998).

d'abandon du labour, les études à travers le monde rapportent généralement une augmentation de l'abondance et de la richesse spécifique de la flore adventice, sauf si l'abandon du labour est compensé par des programmes herbicides renforcés (Darmency *et al.*, 2011). Cette tendance est illustrée ici avec des résultats d'essais Arvalis (figure 6.7) : en cas de labour annuel, l'enherbement diminue rapidement au cours des années alors qu'il augmente en cas de travail du sol superficiel, malgré des opérations de faux semis. Ce n'est que l'introduction de cultures alternatives au blé, notamment de cultures de printemps, qui permet d'enrayer cette progression. Ce suivi pluri-annuel montre aussi que les adventices peuvent ponctuellement réaugmenter lorsque le labour remonte des vieilles semences enfouies pendant les années précédentes (exemple du blé en 2013).

À cause des interactions entre caractéristiques des espèces adventices, histoire culturale et labour, les observations des changements de flore à long terme ne sont donc pas faciles à évaluer sur le terrain. Des expérimentations virtuelles ont ainsi été réalisées avec le modèle FLORSYS qui prédit la dynamique de la flore adventice dans les systèmes de culture dans différents pédoclimats (Colbach *et al.*, 2014c). Elles confirment que l'abandon du labour conduit à une augmentation de l'enherbement mais cette augmentation est plus faible pour des rotations longues (ex. colza/blé/orge/pois vs. colza/blé en Bourgogne) et des flores adventices diverses (ex. Bourgogne vs. Aquitaine) (figure 6.8).

En effet, le labour favorise certaines espèces aux dépens d'autres. Un tour du monde de la littérature conclut que l'abandon du labour sélectionne des graminées

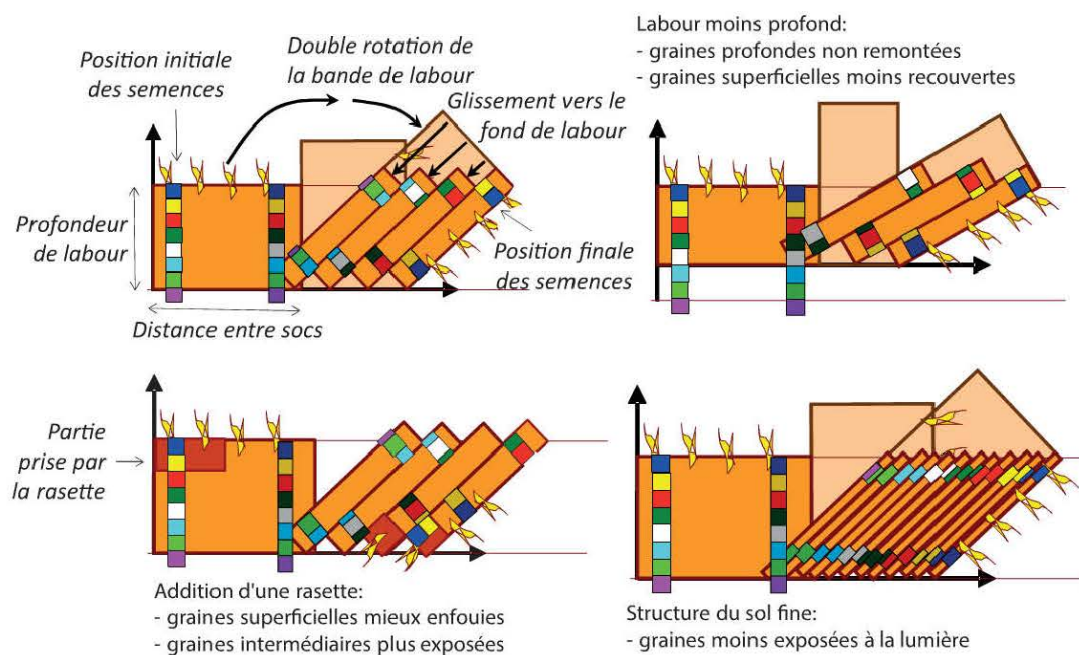


Figure 6.6. Enfouissement et remontée de semences adventices par le labour (Colbach *et al.*, 2000 ; Roger-Estrade *et al.*, 2001)

Plantes de ray grass/m² en fin de cycle

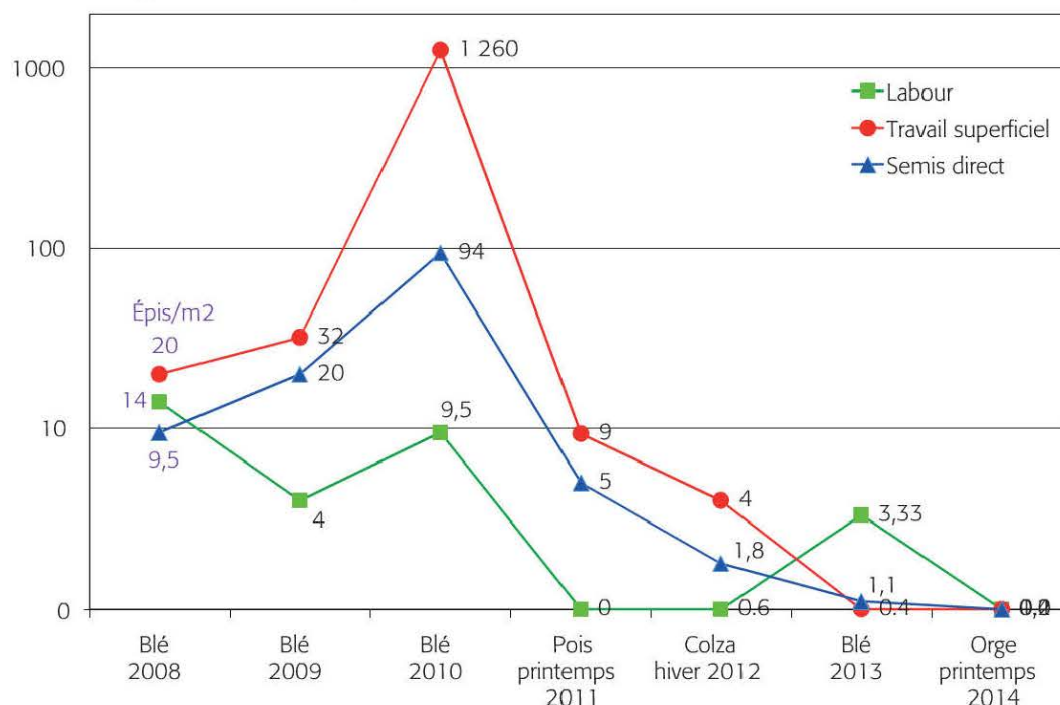
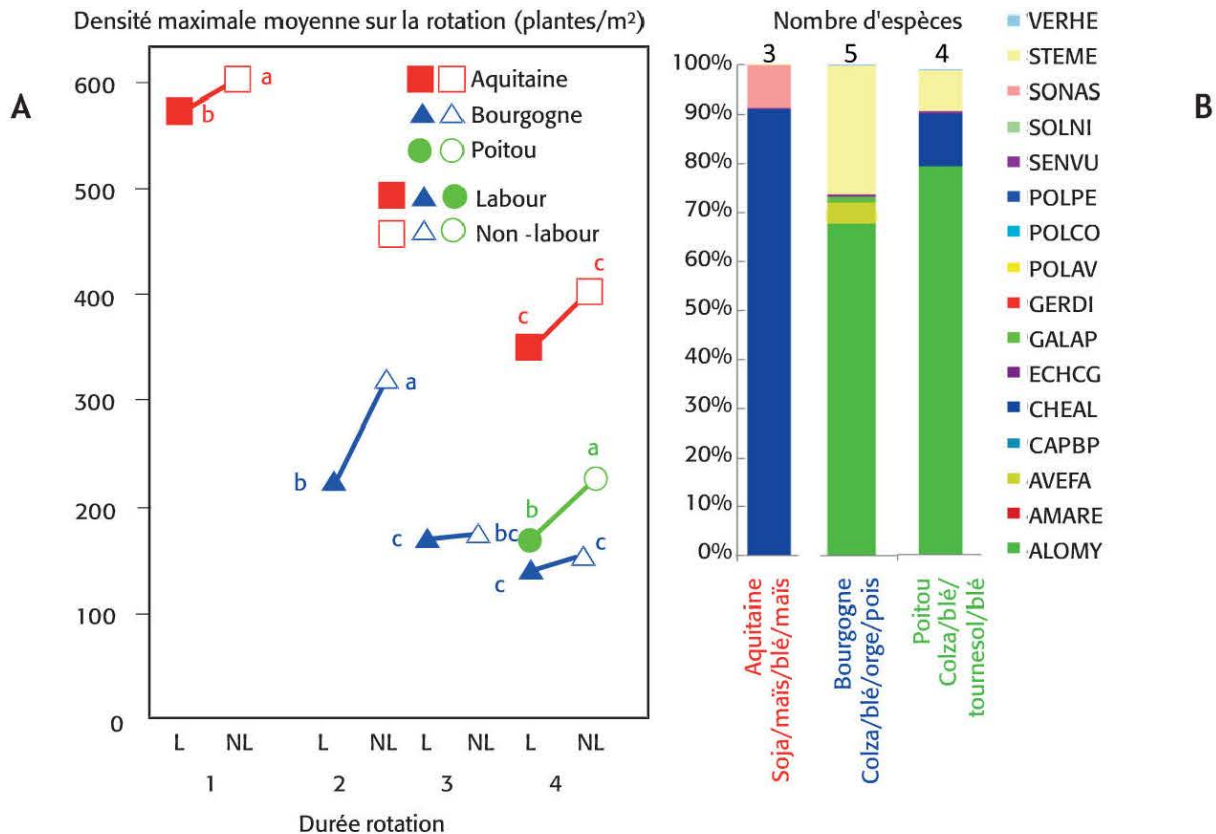


Figure 6.7. Effet du travail du sol sur la population de ray grass (échelle logarithmique) au cours du temps dans un essai conduit à Boigneville (91) en monoculture de blé jusqu'en 2010 puis en rotation. Le blé 2010 ainsi que le ray grass ont été détruits avant l'épiaison. Résultats d'essais ARVALIS.



(NL = chisel, L=labour)

Figure 6.8. Effet de l'abandon du labour sur la flore adventice simulée avec le modèle FLORSYS pour trois régions françaises et différents types de rotations. Moyennes sur 24 années et 10 répétitions climatiques (A = densité maximale moyennée, les densités d'une région donnée accompagnée d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $\alpha=0.05$; B = proportion de plantes de différentes espèces adventices indiquées par leur code EPPO pour les rotations de 4 ans) (basé sur Colbach *et al.*, 2014b) (© Nathalie Colbach 2014).

annuelles, des anémophiles, des espèces ayant de grandes plantes, des adventices et repousses à semences de petite taille, peu dormantes et peu persistantes, à téguments fins, riches en lipides, mais aussi des pérennes dont les organes de survie souterrains sont détruits par le travail du sol et plus généralement, des populations résistantes aux herbicides.

Raisonnement la réduction de la fréquence de labour

Il est cependant possible de réduire la fréquence de labour sans augmenter ni l'enherbement ni les applications d'herbicides si la modification du système de travail du sol est bien réfléchi. Des expérimentations virtuelles pour une rotation typique bourguignonne colza/blé/orge confirment que l'abandon du labour fait exploser l'espèce dominante, le vulpin, mais montre qu'un labour occasionnel peut être aussi efficace qu'un labour annuel pour maîtriser cette adventice très gênante en production céréalière (figure 6.9). Dans cette étude, la meilleure solution était de labourer avant blé, ce qui réduisait le vulpin à un niveau comparable à celui en labour annuel, et ce sans effet de la date de labour, contrairement au

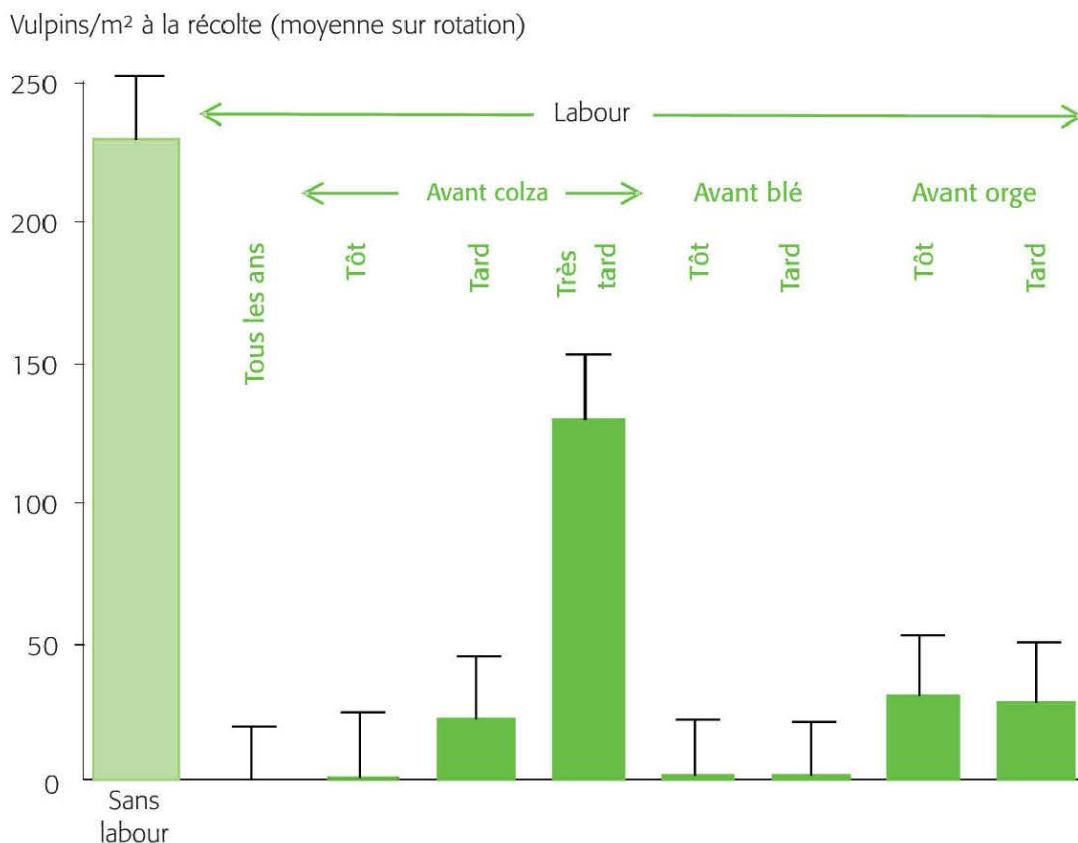


Figure 6.9. Effet de la fréquence de labour sur la densité de vulpin (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dans une rotation colza/blé d'hiver/orge d'hiver simulée avec la version monospécifique de FLORSYS en Bourgogne. Moyennes sur 12 années et 10 répétitions climatiques (basé sur Colbach *et al.*, 2009) (© Nathalie Colbach 2014)

labour avant colza. Plus généralement, la meilleure règle semble être de labourer avant la culture qui est la plus favorable à l'adventice dominante de la rotation, et surtout de labourer lorsque l'infestation du précédent cultural dépasse 30 % de l'enherbement de l'antéprécédent pour enfouir plus de semences adventices que l'on en remonte (Colbach et Mézière, 2013).

L'abandon du travail du sol

L'analyse de la littérature mondiale conduit à la conclusion que l'abandon total de travail du sol entraîne une augmentation du stock semencier adventices (Darmency *et al.*, 2011) parce qu'il n'y a plus de faux semis pour vider le stock semencier, de travail du sol pour enfouir les semences à des profondeurs défavorables à la germination et à la levée, ni de désherbage mécanique avant ou après semis pour détruire les adventices. L'abandon du travail du sol est par conséquent souvent compensé, sur le terrain, par une augmentation de l'usage des herbicides. Sur les parcelles du réseau DEPHY, l'indice de fréquence de traitement (IFT) herbicide augmente ainsi de 1.40 pour les systèmes de culture avec labour systématique, à 1.80 et 1.93 pour les systèmes de travail du sol simplifiés (TCS) et le semis direct, respectivement. Un tiers de l'augmentation est dû au glyphosate en semis direct (Chartier et Tresch, 2014).

Cependant, l'augmentation de l'enherbement en semis direct n'est pas une fatalité. Tout comme en travail du sol simplifié, la diversification de la rotation avec l'introduction de cultures défavorables à l'adventice dominante contribue à maîtriser la flore (exemple de l'introduction de cultures de printemps dans des monocultures de blé envahies par le ray-grass, figure 6.7).

Une autre solution actuellement étudiée est la régulation biologique des adventices. Les résidus d'anciennes cultures et d'adventices laissés à la surface du sol peuvent effectivement limiter la croissance des plantules d'adventices. Plus efficace encore est le semis de la culture de rente dans un couvert implanté pendant l'interculture. Ce dernier étouffe les adventices en limitant la lumière et les nutriments et, dans certains cas, peut les combattre en libérant des molécules allélopathiques (Darmency *et al.*, 2011). Les références publiées en France sur l'effet sur la flore adventice des couverts végétaux sont encore rares, mais très encourageantes. Le réseau semis direct sous couvert de la Chambre d'Agriculture de Lorraine montre par exemple que le semis direct sous couvert entraîne une réduction des adventices dans toutes les cultures, comparé à des systèmes de travail du sol simplifié. La réduction varie d'environ 60 % dans les céréales d'hiver à moins de 10 % dans l'orge de printemps ou le colza (moyenne 2005-2010)⁵. La comparaison par rapport aux parcelles labourées est plus mitigée : tandis que le semis direct sous couvert diminue les dicotylédones de plus de 30 % en blé et colza par rapport au labour, la densité de graminées augmente de 50 % à 100 % en céréales d'hiver. Elle est même multipliée par plus de 20 en orge de printemps. L'augmentation de l'indice de fréquence de traitement herbicide en semis sous couvert dans le réseau lorrain est cependant comparable à celle observée pour le semis direct dans le réseau DEPHY (+0.5 et +0.2 comparé au labour et au travail du sol simplifié). Cette augmentation est due en grande partie au glyphosate.

Conclusion

Le travail du sol apparaît comme un outil indispensable de la gestion intégrée des adventices. Dans le contexte actuel de réduction des herbicides, toute simplification du travail du sol doit se traduire par une adaptation du système de culture et l'abandon du travail du sol nécessite une modification profonde du système de culture. Dans les deux cas (simplification ou abandon total), il est indispensable d'optimiser toutes les techniques culturales (via les combinaisons de techniques, leurs options et les dates des opérations) afin de maximiser le contrôle des adventices nuisibles mais aussi pour influencer les interactions biologiques entre adventices et d'autres organismes de l'agroécosystème avec l'objectif d'une régulation biologique des adventices. Pour cela, il est nécessaire de compléter nos connaissances sur le fonctionnement des adventices en l'absence de travail du sol et notamment sur les interactions entre adventices et d'autres composantes biologiques. Une autre piste de recherche concerne les méthodes de réduction ou de destruction non chimiques des plantes de couverture avant l'implantation de la culture de rente, afin d'éviter les augmentations d'usage d'herbicides.

5 Pour les détails, voir 7 <http://cra-lorraine.fr/fichiers/2-syntheseSD2.pdf>

Références bibliographiques

- Altieri M.A., Whitcomb W.H., 1980. Weed manipulation for insect pest management in corn. *Environmental Management*, 4 (6), 483-489.
- Bàrberi P., Lo Cascio B., 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seed-bank size and composition. *Weed Research*, 41 (4), 325-340.
- Bonin L., Labreuche J., 2007. Gestion des adventices à l'interculture: intérêt du type de déchaumage, In: AFPP - *Vingtième Conférence du Columa, Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes 2007, Dijon, France, 11 et 12 décembre 2007*.
- Chartier N., Tresch P., 2014. Les premiers résultats du réseau Dephy, In: *Réseau DEPHY Grandes cultures et Polyculture Élevage, Journée du 10 avril 2014*, http://www.croppp.org/IMG/pdf/Reseaux_DEPHY_GC-PCE_CAN_P-Tresch-N-Chartier_10-04-14__cle18d11f18e.pdf.
- Colbach N., Mézière D., 2013. Using a sensitivity analysis of a weed dynamics model to develop sustainable cropping systems. I Annual interactions between crop management techniques and biophysical field state variables. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 151, 229-245.
- Colbach N., Granger S., Munier-Jolain N.M., 2009. Using weed dynamics models for evaluating and developing integrated cropping systems, In *XIII^e Colloque international sur la biologie des mauvaises herbes. Dijon, France, 8-10 septembre 2009*, 195-205.
- Colbach N., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2000. Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing. *European Journal of Agronomy*, 13, 111-124.
- Colbach N., Busset H., Roger-Estrade J., Caneill J., 2014a. Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools. *Soil & Tillage Research*, 138, 1-8.
- Colbach N., Granger S., Guyot S.H.M., Mézière D., 2014b. A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 197-204.
- Colbach N., Collard A., Guyot S.H.M., Mézière D., Munier-Jolain N.M., 2014c. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy*, 53, 74-89.
- Délye C., Jasieniuk M., Le Corre V., 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, 29, 649-658.
- Fried G., Norton L.R., Reboud X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 128 (1-2), 68-76.
- Froment A., Jacquin D., Closset M., Priez S., 2013. Incidence des graminées adventices sur l'ergot des céréales, In: AFPP-22e Conférence du COLUMA - *Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France, 10-12 décembre 2013*, 13-18.
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., 2010a. Effects of seed depth and soil structure on the emergence of weeds with contrasted seed traits. *Weed Research*, 50, 91-101.
- Gardarin A., Dürr C., Mannino M.R., Busset H., Colbach N., 2010b. Seed mortality in the soil is related to the seed coat thickness. *Seed Science Research*, 20, 243-256.
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 103 (1), 1-25.
- Jordan N., 1992. Weed demography and population dynamics: Implications for threshold management. *Weed Technol.*, 6, 184-190.

- Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R., Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research*, 43 (2), 77-89.
- Mazoyer M., Roudart L., 1997. Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine, *Éditions du Seuil, Paris*.
- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144, 31-43
- Pekrun C., Lutman P.J.W., 1998. The influence of post-harvest cultivation on the persistence of volunteer oilseed rape. Weed seed banks: determination, dynamics and manipulation. *Aspects of Applied Biology*, 51, 113-118.
- Petit S., Boursault A., Le Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X., 2011. Weeds in agricultural landscapes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 309-317
- Roger-Estrade J., Colbach N., Leterme P., Richard G., Caneill J., 2001. Modelling vertical and lateral weed seed movements during mouldboard ploughing with a skim-coulter. *Soil & Tillage Research*, 63, 35-49.
- Waggoner J.K., Henneberger P.K., Kullman G.J., Umbach D.M., Kamel F., Beane Freeman L.E., Alavanja M.C.R., Sandler D.P., Hoppin J.A., 2012. Pesticide use and fatal injury among farmers in the Agricultural Health Study. *Int Arch Occup Environ Health*, DOI 10.1007/s00420-00012-00752-x.
- Wisler G.C., Norris R.F., 2005. Interactions between weeds and cultivated plants as related to management of plant pathogens. *Weed Science*, 53, 914-917.

Travail du sol et risques de transfert de produits phytosanitaires

P. BENOIT, L. ALLETTO, E. BARRIUSO, C. BEDOS, P. GARNIER, L. MAMY, V. POT, B. REAL,
L. VIEUBLE-GONOD

Les choix techniques en matière de travail du sol influencent la dynamique des bioagresseurs et des adventices, ainsi que l'adaptation des stratégies de lutte. La suppression du labour a souvent tendance à augmenter la pression de certains maladies, ravageurs et adventices, ce qui entraîne des changements de stratégie de la protection des cultures. Une tendance assez générale est d'augmenter la lutte contre la flore de graminées et l'usage d'herbicides non sélectifs en interculture (Chapitre 6). Le développement de l'adoption de techniques culturales sans labour dans de nombreux systèmes de culture a été favorisé par l'usage des herbicides à large spectre à action foliaire, le glyphosate en particulier (Buhler *et al.*, 2000).

Les conditions d'usage des produits phytosanitaires sont un des facteurs conditionnant les risques de leur transfert. Dans le cas de la mise en œuvre des techniques sans labour (ou sans retournement de l'horizon de surface), les effets sur les transferts vers les eaux (ou l'air) des produits phytosanitaires sont étudiés depuis plusieurs années mais encore mal maîtrisés en raison de la diversité des résultats observés et de leur forte dépendance aux conditions d'utilisation (Barriuso *et al.*, 1994 ; Locke & Bryson, 1997; Barriuso *et al.*, 2004). L'intensité et la dynamique des transferts sont étroitement liées à la structuration de la porosité des profils des sols conditionnant la dynamique de l'eau. L'état hydrique conditionne aussi l'intensité des processus de désorption (relargage) et de dégradation. Compte tenu de l'impact du travail du sol sur les états physiques, on comprend pourquoi celui-ci aura surtout des effets sur le devenir des pesticides via des changements des propriétés des sols : physiques et hydriques mais aussi physico-chimiques (matière organique, pH) et biologiques (communautés microbiennes, faune).

Lorsque l'on ne retourne plus le sol, on laisse à la surface une couche formée des résidus de culture : le mulch. La présence de ce mulch est l'autre élément déterminant (avec la modification des états du sol) des différents processus contrôlant le devenir des pesticides en système de non-labour. Ces processus sont en premier lieu l'interception des pesticides par cette couche de résidus végétaux, qui condi-

tionne la proportion de pesticide arrivant directement au sol après l'application, mais aussi l'arrivée différée après lessivage par l'eau des pesticides interceptés dans ce couvert. Cette interception a pour conséquence une localisation des pesticides à la surface, ce qui favorise des phénomènes tels que la photodégradation et la volatilisation. La persistance des pesticides sur et dans les mulch est également contrôlée par des processus de rétention (adsorption/désorption), de transformation (dégradation microbienne) et de transport (lessivage, volatilisation, transport par la macrofaune) dont les mécanismes sont spécifiques aux mulch, par rapport aux mécanismes similaires qui sont à l'œuvre dans les sols.

Étant donné l'existence de revues bibliographiques assez récentes sur les effets du travail du sol sur les processus gouvernant le devenir des pesticides (Alletto *et al.*, 2010), nous avons focalisé ce chapitre sur les données tirées des études en plein champ menées sur des sites instrumentés à l'échelle nationale. Ce texte discute par ailleurs des possibilités d'utiliser le travail du sol comme levier pour réduire les émissions de pesticides en dehors des parcelles cultivées. Enfin, il fait un point sur l'utilisation de la modélisation, appliquée aux situations de simplification du travail du sol, pour l'évaluation des systèmes de culture vis-à-vis de leur performance en termes de réduction des pertes de pesticides.

Effets du travail du sol sur le devenir des pesticides dans les sols

Rétention

Rétention par les mulch

Evaluer le devenir des pesticides dans les systèmes en non-labour passe par une compréhension détaillée des interactions en jeu entre rétention des pesticides et décomposition des mulch de résidus de récolte laissés à la surface du sol. Au cours de leur décomposition, les propriétés physiques et physico-chimiques de ces matières organiques sont modifiées, en lien notamment avec la biodégradation différentielle de certains constituants biochimiques, la colonisation par des microorganismes décomposeurs (bactéries, champignons) et l'action de fragmentation exercée par la mésofaune et la macrofaune du sol. La décomposition des résidus végétaux entraîne une augmentation de l'hydrophobicité et de l'aromaticité et une diminution concomitante du caractère polaire de la matière organique. Ces modifications augmentent considérablement la rétention de pesticides non ioniques. La rétention du glyphosate, une molécule polaire et ionique, est moins affectée par cette dynamique des changements dans la composition des résidus. Néanmoins, le glyphosate retenu sur les mulch est plus facilement lessivable lors de la progression de la décomposition de ces derniers.

Rétention par le sol

Effet des matières organiques et de leur stratification dans le profil

La modification principale liée au non-retournement du sol par rapport aux techniques conventionnelles est la redistribution du carbone organique dans le sol. En

techniques culturales sans labour, les teneurs en carbone organique augmentent dans les 10 premiers centimètres du sol, avec une accumulation de matières organiques en lien avec la présence et la décomposition du mulch ; celles-ci diminuent graduellement avec la profondeur. Pour la plupart des pesticides, la teneur en carbone organique et l'adsorption sont corrélées positivement, ce qui se traduit par une meilleure adsorption en surface en techniques culturales sans labour qu'en labour (Alletto *et al.*, 2010). De même, la désorption est modifiée par les pratiques de travail du sol. Différentes études soulignent que le caractère non réversible de la rétention (hystérésis de la désorption) peut être plus élevé sur des sols en techniques culturales sans labour (Locke & Bryson, 1997) mais ces effets ne sont pas toujours très importants (Alletto *et al.*, 2010).

Effet du pH

Les techniques sans labour contribuent généralement à une acidification des horizons de surface en lien avec l'accumulation de matières organiques (Alletto *et al.*, 2010). Pour de nombreuses matières actives, la rétention tend à augmenter lorsque le pH diminue. Cet effet de l'acidification dépend des propriétés des molécules, en particulier de leur pKa (Alletto *et al.*, 2010). Ainsi, cette augmentation de la teneur en matière organique et une éventuelle acidification du milieu ont tendance à augmenter la rétention de nombreux pesticides (Barriuso *et al.*, 2004 ; Alletto *et al.*, 2010).

Autres effets

D'autres propriétés du sol impactant la rétention des pesticides sont modifiées par le travail du sol. En particulier, la présence de mulch augmente la teneur en eau et tempère les fluctuations de température à la surface du sol. Mais les effets de la température et de la teneur en eau sur les processus de rétention sont mal connus et controversés. Une teneur en eau plus élevée dans le sol peut être à l'origine d'une moindre adsorption par les constituants du sol (Alletto *et al.*, 2010). D'autres auteurs supposent au contraire que la présence d'eau à la surface des matières organiques diminue leur hydrophobicité et favorise l'accessibilité de certains sites d'adsorption, ainsi que des interactions impliquant des liaisons hydrogène (Alletto *et al.*, 2010).

Dégradation

Dégradation dans les mulch

La décomposition des mulch affecte aussi les activités microbiennes impliquées dans la dégradation des pesticides. Rampoldi *et al.* (2011) ont comparé le devenir du glyphosate (marqué au ^{14}C) appliqué sur un sol d'Argentine nu et sur le même sol couvert de mulch en laboratoire. Après 7 semaines, 74 % du glyphosate a été minéralisé (transformé en CO_2) sur le sol nu, mais seulement 27 % sur le mulch. La présence de mulch a davantage favorisé la production de résidus liés ou non extractibles (37 %) et la persistance de la molécule (16 %) dans l'eau (fraction lixiviable). Dans un travail mené sur des mulch de résidus de maïs, Aslam *et al.* (2014)

ont montré que la dégradation du glyphosate était plus rapide dans les résidus frais que dans les résidus décomposés ; la présence de carbone facilement assimilable par les microorganismes favorisant la dégradation du glyphosate par co-métabolisme. Doublet *et al.* (2009) ont montré que dans ces conditions, la minéralisation dans le sol du glyphosate incorporé dans les résidus végétaux diminue et que les proportions extractibles (formées par le glyphosate et son principal métabolite l'AMPA) et non extractibles augmentent. Ainsi, la durée de demi-vie du glyphosate associé aux résidus végétaux peut être multipliée par six, en comparaison à celle du glyphosate directement appliqué au sol.

Dégradation dans les sols

En techniques culturales sans labour, l'accumulation en surface de biomasse microbienne liée à la stratification de la matière organique déjà évoquée a des répercussions sur la dégradation des pesticides. En particulier, la concentration de résidus végétaux en surface favorise le développement de champignons qui sont impliqués dans la dégradation incomplète des pesticides.

La dégradation microbienne peut donc être stimulée, avec une diminution de la persistance du pesticide appliqué, mais d'un point de vue environnemental, cette dégradation ne fait pas diminuer forcément les risques de contamination. En effet, si la dégradation du pesticide est incomplète, cela entraînera la formation de produits de dégradation pouvant être plus mobiles et/ou toxiques que le pesticide, pouvant aussi favoriser la formation de résidus non extractibles et donc l'augmentation de la persistance environnementale du pesticide ou de ses produits de dégradation (Alletto *et al.*, 2010).

Effets du travail du sol sur les transferts des pesticides

Ruissellement

Dans les limons battants du Sundgau (68), Arvalis - Institut du végétal en collaboration avec l'Araa et Syngenta ont étudié depuis 2002 l'influence du travail du sol sur le ruissellement et les transferts d'herbicides en monoculture de maïs. Dans cette région au climat continental, la plus grande partie des pluies annuelles survient d'avril à juin sous forme d'orages dont l'intensité peut varier de 40 à 100 mm/h (Van Dijk *et al.*, 2007 ; 2008). Des ruissellements y sont fréquents sur des cultures de printemps ne couvrant pas le sol et il n'est pas rare d'observer de l'érosion provoquant des coulées boueuses. Le site expérimental de Geispitzen comporte trois parcelles de 3 ha isolées hydrauliquement et instrumentées pour y mesurer les flux de ruissellement et prélever des échantillons d'eau proportionnels aux débits afin d'y analyser la présence d'herbicides. Le premier constat de ces études entreprises depuis 2002 est que les quantités ruisselées sont nettement plus faibles en techniques culturales sans labour qu'en parcelle labourée et peuvent être nulles au cours de certaines campagnes (figure 7.1).

Lors d'un événement observé en 2007 (figure 7.1), une pluie d'intensité moyenne (27 mm) est survenue entre 0 et 5 h du matin (avec une intensité maximale de

62 mm/h). Le volume ruisselé de la parcelle en techniques culturales sans labour a représenté 5 % du volume ruisselé mesuré dans la parcelle labourée. On y observe un arrêt rapide du ruissellement alors qu'il continue pendant plus de 5 h dans la parcelle labourée.

Sur l'ensemble d'une campagne couvrant la culture du maïs, non seulement les volumes ruisselés sont moins élevés en techniques culturales sans labour mais la date du premier ruissellement est plus tardive (figure 7.2).

Le volume de ruissellement plus faible sur les parcelles sans labour réduit les possibilités de transfert des herbicides appliqués sur la culture du maïs. D'autre part, comme la date du premier ruissellement est retardée de plusieurs mois, les herbicides appliqués en avril et mai ont subi des processus de dégradation et les quantités disponibles pour le transfert par ruissellement sont moindres. C'est ce qu'on observe sur la figure 7.3 qui regroupe plusieurs années d'étude.

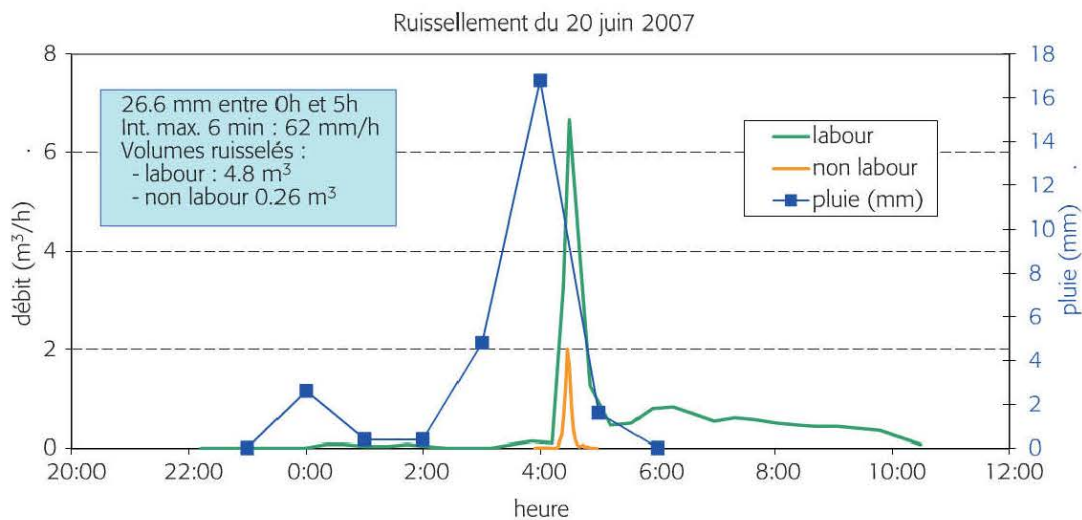


Figure 7.1 : Effet du travail du sol sur le ruissellement. Hydrogrammes mesurés le 20 juin 2007 sur le site de Geispitzen (Alsace).

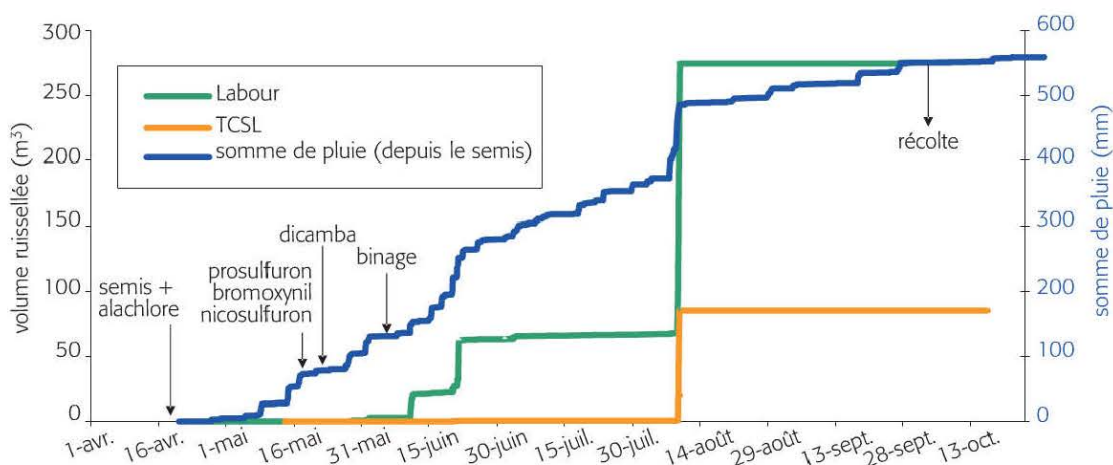
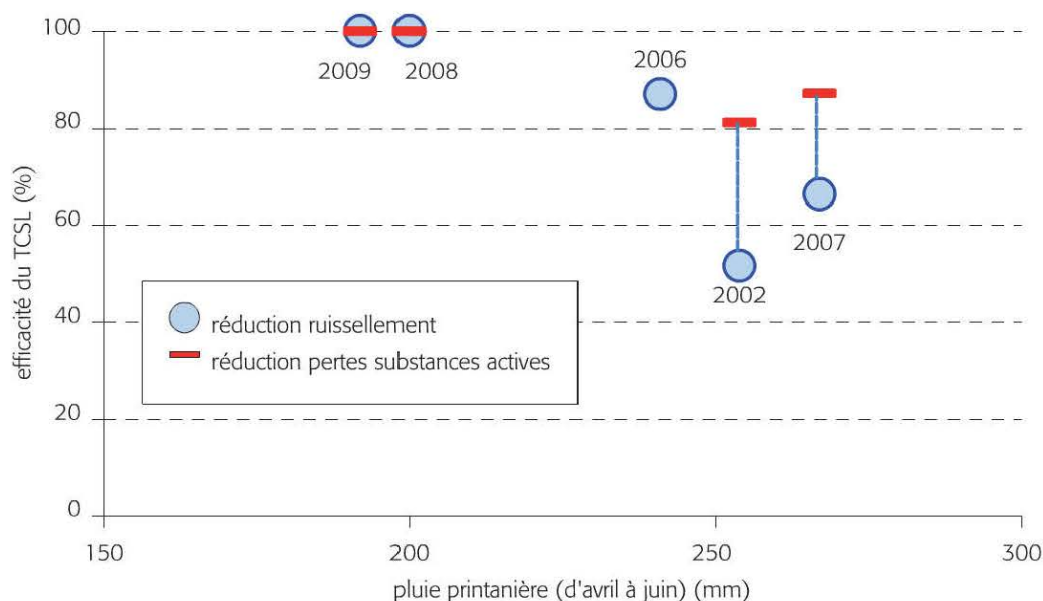


Figure 7.2 : Effet du travail du sol sur les dates de ruissellement. Campagne 2007, Site de Geispitzen (Alsace).



TCSL : techniques culturales sans labour

Figure 7.3 : Réduction en % des transferts d'eau de ruissellement en TCSL par rapport aux écoulements et transferts d'herbicide de la parcelle en labour. Site de Geispitzen (Alsace).

Armand *et al.* (2009) ont montré que la stabilité structurale des parcelles conduites sans labour était plus longtemps préservée au cours de la saison qu'en labour : le mulch constitué par les résidus en surface joue un rôle de protection contre l'effet « splash » des gouttes de pluie. La présence de résidus de culture (15 à 30 % de la surface du sol) augmente la rugosité de surface, ralentit les vitesses de ruissellement, diminue l'érodabilité de surface et permet ainsi de réduire le transfert d'herbicides adsorbés sur les matières en suspension.

Par ailleurs, les mesures d'infiltrométrie réalisées confirment une plus grande porosité de la surface du sol ce qui limite aussi les volumes ruisselés. L'évolution des croûtes sédimentaires en fonction de la pluviosité montre une très nette différence de l'état structural de surface entre labour et non-labour (Armand *et al.*, 2009).

Enfin, le dénombrement des différentes espèces de vers de terre ne montre pas de grandes différences des nombres d'individus selon les deux modalités (30,2 anéciques/m² en labour versus 40,7 en non-labour ; 43,8 endogés/m² en labour versus 38 en non-labour ; 14,5 épigés/m² en labour versus 15,8 en non-labour) mais on constate que leur biomasse est très différente : 20,1 g/m² pour les anéciques versus 38,6 g/m² en non-labour, 7,2 g/m² pour les endogés en labour versus 15,4 g/m² en non-labour et 0,8 g/m² pour les épigés en labour versus 2 g/m² en techniques culturales sans labour (Van Dijk *et al.* 2009). Ces différences peuvent être à l'origine d'une activité plus importante en techniques culturales sans labour permettant une meilleure infiltration de l'eau par les circuits préférentiels que constituent les galeries de vers de terre ainsi qu'une meilleure activité biologique qui préserve mieux la stabilité structurale de surface.

Lixiviation

L'hypothèse d'une augmentation des risques de transferts verticaux en l'absence de travail du sol est souvent avancée. En effet, le maintien d'une continuité porale en l'absence de travail du sol par retournement (charrue) peut accroître l'infiltration de l'eau dans le sol et les flux préférentiels (via des macropores, par ex. galeries de vers de terre, fentes de retrait) de pesticides vers les eaux souterraines ou vers des voies de transferts hypodermiques (Alletto *et al.*, 2010). Néanmoins, l'ensemble des études menées en conditions de plein champ ne montrent pas systématiquement ce type de comportement. Par exemple, Fomsgaard *et al.* (2003) ont comparé la lixiviation du glyphosate et de son métabolite (l'AMPA), pendant un an sur des sites équipés en lysimètres au Danemark et n'ont pas observé de différences entre deux sites labourés et deux sites en non-labour.

En France, sur les essais pratiques culturales et qualité des eaux de La Jaillière (Arvalis), les flux totaux de pesticides (mesurés de 1993 à 2010) transférés par drainage sur les parcelles labourées étaient supérieurs aux flux totaux des parcelles conduites en non-labour au cours de quatre campagnes sur 11 (36 %). En ce qui concerne le temps de transfert, les différentes campagnes suivies montrent autant de cas en faveur du labour que du non-labour. L'observation des flux totaux drainés et des temps de transfert ne permettent donc pas de statuer clairement sur l'effet du type de travail du sol vis-à-vis des transferts de substances actives (Marks-Perreau *et al.*, 2012). Néanmoins le comportement hydrodynamique du non-labour est toujours le même en début de saison de drainage : les premiers pics d'écoulement sont toujours plus intenses. En cours de saison de drainage et en fin de saison, on assiste à un tarissement plus rapide des écoulements en situation de non-labour (figure 7.4).

Cette différence de fonctionnement hydrodynamique peut avoir deux conséquences directes : un transfert plus important sur les parcelles sans labour des herbicides appliqués en automne juste avant la saison de drainage (figure 7.5) et

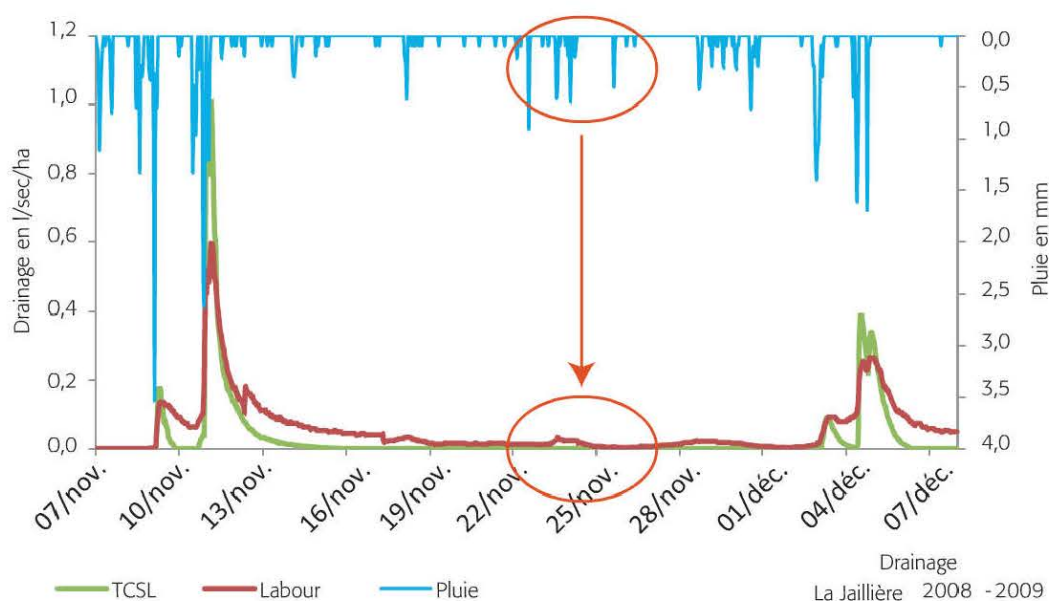


Figure 7.4 : Hydrogrammes des parcelles en labour et en TCSL, site de la Jaillière (Pays de Loire)

une diminution des risques de transfert des herbicides appliqués sur cultures de printemps en fin de saison de drainage.

La plus forte intensité du premier « pic » de drainage observé sur des parcelles sans labour malgré une date identique d'amorce de ce transfert hydrique est due à la présence de fentes de retrait en profondeur dans le profil. Celles-ci sont plus longues à se rétracter sous labour car le travail du sol a rompu leur continuité hydraulique avec la surface du sol. Comme les concentrations en herbicide mesurées dans les eaux de drainage de la parcelle sans labour sont beaucoup plus élevées que dans les eaux de la parcelle en labour, le premier flux de diflufenicanil (DFF) est très important. En fin de saison, les quantités de DFF transférées par réseau de drainage sont presque trois fois plus élevées en parcelle sans labour qu'en parcelle labourée.

En revanche, on constate que les transferts de substances actives qui ont des demi-vies (DT50) relativement longues (plusieurs mois) et qui sont appliquées au printemps présentent des transferts plus faibles au cours de l'automne suivant dans les parcelles conduites sans labour. L'activité biologique dans les premiers centimètres du sol y est plus intense au cours de l'été et pourrait conduire à une dégradation plus rapide que dans les parcelles labourées.

Volatilisation

Le travail du sol affectant les propriétés de surface du sol (température, teneur en eau, rugosité, nature de l'interface avec l'atmosphère : sol ou mulch), il a des effets importants sur le processus de volatilisation depuis le sol. De tels effets sont souvent évoqués pour expliquer des différences de persistance observées entre

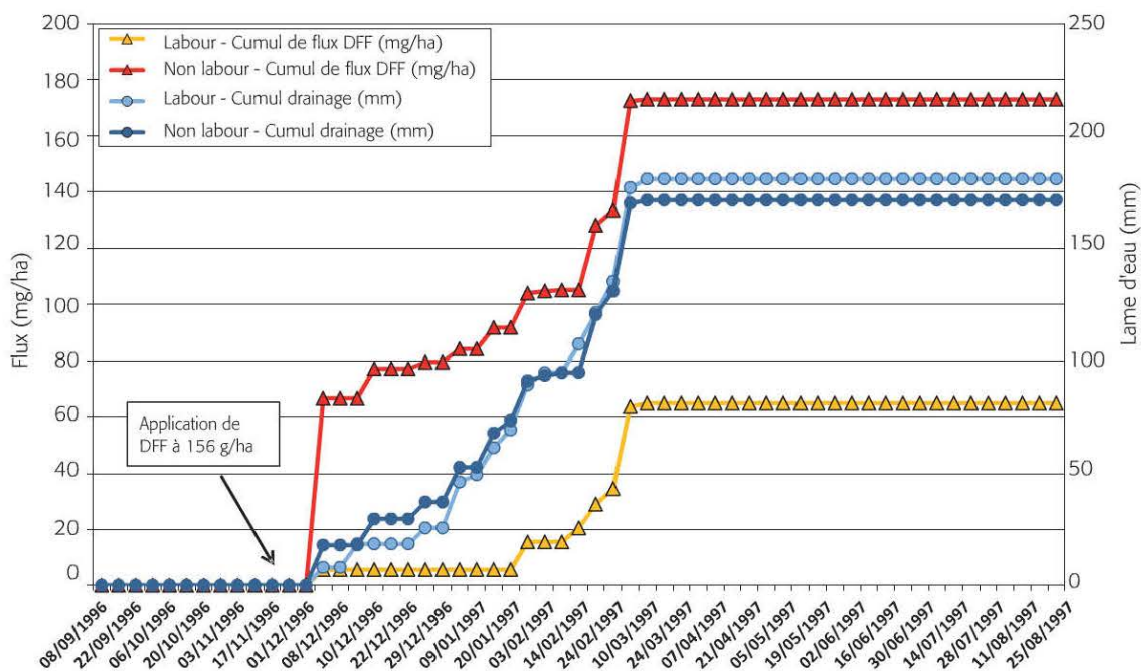


Figure 7.5 : Transfert de diflufenicanil (DFF) en parcelle labourée et en non-labour. Campagne 1996-1997, site de la Jaillièrre (Pays de Loire).

différentes modalités de travail du sol, mais leur déterminisme est mal expliqué (Alletto *et al.*, 2010). La volatilisation est généralement augmentée lorsque la température s'accroît mais en cas de dessèchement du sol, le processus d'adsorption depuis la phase gazeuse entraîne une diminution de la volatilisation (Garcia *et al.*, 2014). Il est par ailleurs assez bien connu que l'incorporation dans le sol réduit de façon sensible la volatilisation des composés les plus volatils et cette pratique est parfois recommandée après l'application sur le sol.

Des références déjà anciennes concernant des mesures au champ montrent que les mulch ont des effets importants sur la volatilisation. En représentant une surface d'échange importante avec l'atmosphère, les mulch peuvent favoriser la volatilisation. Cependant, d'autres facteurs interviennent. Non seulement ils modifient les conditions de température et d'humidité à la surface du sol (et auront donc un effet sur l'ensemble des processus ayant lieu dans le sol, cf. sections précédentes) mais les résidus végétaux présents sont capables d'intercepter une proportion importante des quantités appliquées. Ainsi, tout processus influençant la disponibilité du pesticide dans le mulch (cf. sections précédentes) a des conséquences sur l'intensité de la volatilisation.

La prédiction de l'effet du mulch sur la volatilisation reste donc encore incertaine. Peu de jeux de données existent. Whang *et al.* (1993) montrent que la présence de mulch augmente la volatilisation de deux insecticides organophosphorés pendant une saison culturale : 48 % contre 18 % de la quantité appliquée pour le fonofos, 23 % contre 7 % pour le chlorpyrifos, respectivement en non-labour et en labour. Wienhold & Gish (1994) ont aussi observé des flux de volatilisation supérieurs en techniques sans labour pour l'alachlore et l'atrazine mais uniquement jusqu'à l'intervention de la première pluie. Suite à cette pluie, la volatilisation est considérablement ralentie et les auteurs expliquent cette réduction du flux de volatilisation par le lessivage des mulch et le transfert des molécules dans le sol sous le mulch qui, sur une période de 35 jours après traitement, entraîne un bilan de volatilisation supérieur dans le témoin labouré sans mulch. Récemment, les flux de volatilisation du S-métolachlore et de son phytoprotecteur le bénomacor ont été suivis durant 3 jours avec des tunnels de ventilation disposés au champ, l'un sur sol nu, l'autre sur un sol recouvert d'un mulch. Ces travaux montrent que le mulch en modifiant les conditions de surface semble impacter la dynamique de la volatilisation (Marin-Benito *et al.*, 2013).

Méthodes et outils pour réduire les risques de transfert

Le travail du sol : un élément du système de culture parmi d'autres

Pour réduire la dépendance aux pesticides

En France, pour les grandes cultures, les dernières statistiques agricoles font ressortir une plus forte dépendance des systèmes sans labour vis-à-vis des herbicides (Agreste, 2006).

Néanmoins, un des enjeux dans les systèmes de grandes cultures reste d'associer la maîtrise des techniques de travail du sol à d'autres pratiques permettant de réduire le recours au contrôle chimique des bioagresseurs et de s'affranchir des problèmes d'érosion d'efficacité des pesticides pouvant mener à des impasses techniques.

C'est en particulier le défi que relève aujourd'hui la protection intégrée des cultures, dont les objectifs sont de limiter les pressions des bioagresseurs et d'adventices avec un recours minimal aux pesticides et de maintenir un niveau de performance agronomique et économique acceptable pour les agriculteurs. Outre une action sur les rotations (allongement, diversification), la protection intégrée s'appuie sur une adaptation des techniques de travail du sol pour gérer les banques de graines d'adventices, le choix de date de semis et de modes de préparation de lits de semence adaptés (densités, largeur de rang), le choix de variétés plus résistantes et les pratiques alternatives de contrôle de bioagresseurs telles que le désherbage mécanique (Chikowo *et al.*, 2009).

Pour réduire les transferts

Alletto *et al.* (2012) ont observé une interaction positive entre la simplification du travail du sol et l'utilisation d'une interculture (type culture intermédiaire piège à nitrates) sur les pertes de l'herbicide isoxaflutole et isoxaflutole et de son métabolite actif, le dicétonitrile (une des alternatives herbicides utilisées en remplacement de l'atrazine) en monoculture de maïs irrigué (Midi-Pyrénées) : en techniques culturales sans labour, les pertes en herbicides ont été 1,6 fois plus faibles par rapport au labour, alors qu'en combinant non-labour et cultures intermédiaires, elles sont 4,5 fois plus faibles par rapport au labour (figure 7.6).

La modélisation comme outil pour tester des scénarios et anticiper des changements de pratiques

Mieux décrire les rétroactions entre pratiques, états du milieu, et transferts

L'évaluation des performances environnementales des systèmes de culture en termes de transfert de pesticides peut être réalisée via l'utilisation d'indicateurs ou de modèles numériques. Elle l'est également via des observations de terrain et en particulier des mesures de pertes en pesticides à l'échelle de la parcelle. Pour ce qui est des modèles de dissipation et de transfert de pesticides, une des questions centrales concerne leur capacité à simuler correctement les flux d'eau et de pesticides dans des situations variées de travail du sol. Il apparaît que la représentation des pratiques culturales reste relativement peu détaillée dans ces modèles (Mottes *et al.*, 2014) et ne permet pas de prendre en compte les effets du travail du sol comme ceux des mulch ou de l'interculture.

Les performances de trois modèles reconnus par l'Union européenne pour l'évaluation des risques liés aux pesticides dans le cadre de leur homologation ont été récemment évaluées dans des contextes de travail du sol différents. Marin-Benito *et al.* (2013) ont comparé et évalué la capacité de ces modèles à décrire les flux

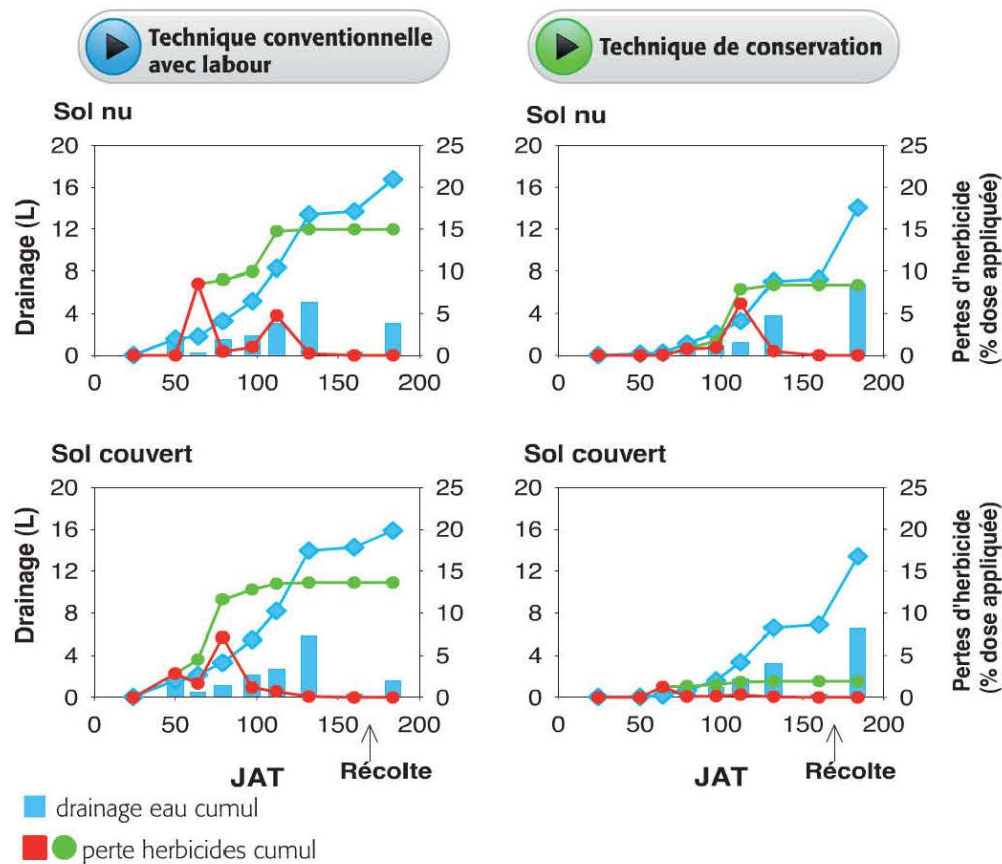


Figure 7.6 : Drainage d'eau et pertes de l'herbicide dicétonitrile en fonction du travail du sol et en fonction de présence ou non de cultures intermédiaire en monoculture de maïs irrigué (Midi-Pyrénées) en 2005, d'après Alletto *et al.* (2012).

hydriques et les flux de S-métolachlore tels qu'ils ont été mesurés au champ sur un essai systèmes de culture implanté sur le domaine de Lamothe (INPT Purpan, 31) comparant différents systèmes en monoculture de maïs irrigué : une monoculture de maïs conventionnelle avec une interculture en sol nu, et une monoculture de maïs avec une interculture constituée d'un couvert phacélie-vesce-avoine et conduite en technique de strip-till. Il ressort de cette étude que ces modèles décrivent difficilement :

- les pratiques culturales mises en œuvre dans des systèmes de culture innovants, par exemple l'effet des cultures intermédiaires ou la présence de mulch ;
- la dynamique temporelle des propriétés hydrodynamiques et des états de surface;
- le développement des plantes dans des successions pluriannuelles ou dans des cultures associées.

Ce travail montre par ailleurs qu'une modélisation des flux préférentiels est nécessaire pour décrire correctement les transferts, tout comme une prise en compte détaillée des états de surface (mulch) dans la modélisation des flux de volatilisation (Marin-Benito *et al.*, 2013).

Mieux comprendre les effets des mulch

En agriculture de conservation, les résidus de récolte laissés en mulch à la surface du sol peuvent modifier fortement le devenir des pesticides. Leur composition

chimique et les conditions climatiques sont des facteurs déterminants de l'impact du mulch sur la dynamique des pesticides. La modélisation du devenir des pesticides dans le mulch peut servir à l'évaluation des impacts environnementaux de ces systèmes de culture qui sont actuellement adoptés à un rythme rapide en France et dans plusieurs régions du monde pour des motivations d'ordre économique et liées à l'organisation du travail.

Le modèle COP-Soil a été récemment développé pour tenir compte des interactions entre décomposition des mulch et processus de dégradation et de rétention des pesticides (Aslam *et al.*, 2014). La modélisation de la dynamique des matières organiques indique que l'activité microbienne évolue au cours de la décomposition et dépend de la qualité initiale des résidus végétaux. La modélisation basée sur le couplage entre matière organique et pesticides permet de simuler la dégradation du glyphosate dans le mulch en utilisant la biomasse microbienne développée lors de la décomposition du mulch. Le glyphosate ainsi que ses métabolites sont bien simulés par le modèle à la fois pour les compartiments solubles et adsorbés. La modélisation des résidus non extractibles suggère qu'une distinction entre biomasses bactérienne et fongique aurait certainement amélioré le paramétrage du modèle pour cette fraction. Une des hypothèses du modèle prévoit que l'adsorption est influencée par la nature des résidus. Elle ne peut cependant pas être testée pour le glyphosate, car l'adsorption de cette molécule polaire est peu sensible à la composition de la matière organique. Les conditions climatiques contrôlant l'état hydrique des mulch doivent être considérées lors de la prédiction du devenir des pesticides dans les mulch et le sol qu'ils recouvrent.

Par ailleurs, le modèle PASTIS mulch (Findeling *et al.*, 2007) a été couplé avec le module pesticide de Saffih-Hdadi *et al.* (2003) et a été testé afin de simuler la dynamique des pesticides dans le mulch. Ce modèle utilise un module spécifique inspiré du modèle COP-Soil permettant de prédire la dégradation et la formation des résidus non extractibles (Aslam *et al.*, 2014) et a été testé avec deux herbicides, glyphosate et S-métolachlore. Les simulations avec PASTIS ont indiqué que 43-49 % des pesticides sont interceptés par le mulch et y persistent même après 84 jours de cycles d'évaporation et de pluie. L'analyse de sensibilité indique que les sorties du modèle telles que les quantités de pesticides lixiviés sont sensibles à la teneur en eau seuil du mulch qui contrôle la diffusion du pesticide vers l'eau de pluie traversant le sol. Le temps d'arrivée de la première pluie après l'application des pesticides est également un paramètre très important. Le modèle doit être maintenant appliqué sur le terrain afin de tester sa capacité à évaluer l'impact des mulch sur le devenir des pesticides utilisés dans des systèmes en agriculture de conservation.

Conclusion

L'absence de travail du sol ne diminue pas systématiquement les transferts de pesticides vers les eaux. Les effets du travail du sol sur le transfert des pesticides sont complexes à cause des multiples processus impliqués qui peuvent avoir des effets contradictoires. Les acquis des travaux récents montrent que les effets de l'augmentation de l'activité microbienne en surface du sol non labouré sur la

biodégradation des pesticides ne sont pas synonymes d'une réduction des risques de transfert, en particulier ceux qui sont liés à la mobilité accrue de certains métabolites. Des lacunes importantes concernent la connaissance des effets du travail du sol et du mulch sur la volatilisation des pesticides où un couplage des différents processus ainsi qu'une meilleure description des conditions d'humidité et de température de surface sont cruciaux. Des jeux de données sont nécessaires sur les insecticides et fongicides dans les systèmes en techniques culturales sans labour comme le semis direct ou les systèmes avec couverture végétale permanente (SCV). La forte dépendance des systèmes en agriculture de conservation à l'utilisation du glyphosate demande de rapidement développer des solutions techniques alternatives pour ne pas avoir à utiliser ce type d'herbicide.

Par ailleurs, les effets du travail du sol sur les risques de transfert de pesticides sont fortement dépendants des aspects pédoclimatiques (type de sol, précipitations,...) et de la place du travail du sol dans l'itinéraire technique et la succession des cultures. Autrement dit, c'est bien à l'échelle du système de culture que l'évaluation des effets du travail du sol doit se faire. Concernant les pratiques innovantes, il y a un besoin de données et de connaissances sur ces nouveaux systèmes de culture « en rupture ». Ces connaissances permettront *in fine* une évaluation intégrée de tous les flux à l'échelle pluriannuelle. L'évaluation doit reposer sur des travaux combinant des observations sur des dispositifs instrumentés sur le terrain et des développements ou des adaptations de modèles et d'indicateurs.

Références bibliographiques

- Agreste, 2006. Dans le sillon du non-labour. *Agreste-Primeur*, n° 207, février 2008
- Alletto L., Benoît P., Justes E., Coquet Y., 2012. Tillage and fallow period management effects on the fate of the herbicide isoxaflutole in an irrigated continuous-maize field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 153, 40–49.
- Alletto L., Coquet Y., Benoit P., Heddadj D., Barriuso, E., 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 367–400.
- Armand R., Bockstaller C., Auzet A.V., Van Dijk P., 2009. Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability. Application to conservation tillage context. *Soil and Tillage Research*, 102, 27–37.
- Aslam S., Benoit P., Chabauty F., Bergheaud V., Geng C., Vieublé-Gonod L., Garnier, P., 2014. Modeling the impacts of maize decomposition on glyphosate dynamics in mulch. *European Journal of Soil Science*, 65, 231–247.
- Barriuso E., Calvet R., Curé B. 1994. Incidence de la simplification du travail du sol sur le comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution. In : Simplification du travail du sol, G. Monnier, G. Thevenet, B. Lesaffre Ed., *Les Colloques Ed., INRA*, N°65, 105–124.
- Buhler D.D., Liebman M., Obrycki J., 2000. Theoretical and practical challenges to an IPM approach to weed management. *Weed Sci.* 48, 274–280.
- Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain N., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132 (2009) 237–242.

- Doublet J., Mamy L., Barriuso, E., 2009. Delayed degradation in soil of foliar herbicides glyphosate and sulcotrione previously absorbed by plants: Consequences on herbicide fate and risk assessment. *Chemosphere*, 77, 582-589.
- Findeling A., Garnier P., Coppens F., Lafolie F., Recous, S., 2007. Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. *European Journal of Soil Science* 58, 196-206.
- Fomsgaard I.S., Spliid N.H., Fielding G., 2003. Leaching of pesticides through normal-tillage and low-tillage soil- A lysimeter study. II Glyphosate. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, & Agricultural Wastes*, 38, 19-35.
- Garcia L., Bedos C., Géniermont S., Benoit P., Barriuso E., Cellier P., 2014. Modelling pesticide volatilization from bare soil: a study of the effect of gaseous adsorption on mineral soil fraction. *Environ. Sci. Technol.*, in press. [dx.doi.org/10.1021/es5000879](https://doi.org/10.1021/es5000879).
- Marín-Benito J.M., Pot V., Alletto L., Mamy L., Bedos C., Van den Berg E., Barriuso E., Benoit, P., 2013. Modélisation de la lixiviation des pesticides et comparaison de modèles – *Livrable D2.2_2. ANR MicMac Design*.
- Marks-Perreau J., Dutertre A., Gillet J.P., Réal B., Leprince F., Bodilis A.M., Maillet-Mezeray J., 2012. Transfert des produits phytopharmaceutiques sur le site de La Jaillière – Synthèse pluriannuelle 1993-2010. *Compte rendu interne. Arvalis – Institut du végétal*.
- Mottes C., Lesueur-Jannoyer M., Le Bail M. & Malézieux E. (2014) Pesticide transfer models in crop and watershed systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 229-250
- Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvrey J.F., Réal B., Germon J.C., De Tournonnet S., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France. *Ademe-Arvalis - Institut du végétal-Inra-APCA-Areas-ITB-Cetiom- IFVV*, 400 pages.
- Locke M.A., Bryson C.T., 1997. Herbicide-soil interactions in reduced tillage and plant residue management systems. *Weed Science*, 45, 307-320.
- Rampoldi E.A., Hang S., Barriuso E., 2011. The fate of glyphosate in crop residues. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 553.
- Saffih-Hdadi K., Bruckler L., Barriuso, E., 2003. Modeling of sorption and biodegradation of parathion and its metabolite paraoxon in soil. *Journal of Environmental Quality* 32, 2207-2215.
- Van Dijk P., Koller R., Lasserre D., Gaudillat D., 2007. L'impact du non-labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale. Résultats de la campagne 2007 sur le site de Geispitzen. *Compte – rendu interne Araa - Arvalis – Institut du végétal - CDA 68 – Syngenta*, 34 pages.
- Van Dijk P., Koller R., Lasserre D., Gaudillat D., 2008. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale. Résultats de la campagne 2008 sur le site de Geispitzen. *Compte – rendu interne Araa - Arvalis – Institut du végétal - CDA 68 – Syngenta*, 27 pages.
- Van Dijk P., Koller R., Lasserre D., Gaudillat D., 2009. Campagne 2009 sur le site de Geispitzen – Transfert de produits phytosanitaires par ruissellement en fonction du désherbage et du travail du sol. *Compte – rendu interne Araa - Arvalis – Institut du végétal - CDA 68 – Syngenta*, 26 pages.

Whang J.M., Schomburg C.J., Glotfelty D.E., Taylor A.W., 1993. Volatilization of fonofos, chlorpyrifos, and atrazine from conventional and no-till surface soils in the field. *Journal of Environmental Quality* 22, 173-180.

Wienhold B.J., Gish T.J., 1994. Effect of formulation and tillage practice on volatilization of atrazine and alachlor. *Journal of Environmental Quality* 23, 292-298.

La technique strip till

D. BRUN, Y. DELAGE

Pourquoi travailler le sol sur 100 % de la surface pour l'implantation de culture tous les 75 à 80 cm ? Comment limiter les problèmes d'érosion des terres ? C'est en répondant à ces questions qu'est née, aux États-Unis, la technique « strip till ». Celle-ci se définit par un travail ciblé de la future ligne de semis et par une absence de travail entre ces lignes. En développement depuis 2 à 3 ans en France, la technique donne des résultats satisfaisants lorsque sa mise en œuvre est bien maîtrisée. L'expression provient de l'anglais « strip » qui désigne « bande » et « tillage » qui signifie « travail du sol » dans son acception générale. Les outils permettant de réaliser ce type de travail sont appelés « strip tillers ».

Historique de la technique

C'est une catastrophe écologique, le « Dust Bowl », qui est à l'origine de la prise de conscience des effets néfastes du travail du sol classique tel qu'il était pratiqué en Amérique du Nord. Dans les années 30 et durant une décennie, des sécheresses combinées au maintien d'un sol intégralement nu provoquent une érosion sans précédent avec d'importantes tempêtes de poussières. Face à l'ampleur du phénomène, le gouvernement américain décide de créer dès septembre 1933 le « Soil Erosion Service » afin d'aider les agriculteurs à lutter contre cette érosion. À l'origine temporaire, ce service est pérennisé puis transféré dès 1935 vers le Ministère de l'Agriculture et devient le Soil Conservation Service. En 1994, le service change de nom et devient le Natural Resources Conservation Service tout en restant un service du ministère de l'agriculture américain (USDA). Les efforts ont tout d'abord porté sur les techniques antiérosives et la conservation du sol : cultures selon les courbes de niveau, espèces limitant l'érosion, culture d'espèces en bandes alternées... En parallèle, le matériel évolue notamment dans le milieu des années 1960 avec les premiers outils de semis direct à disques (semoir à maïs No Til du constructeur Allis-Chalmers).

Au printemps 1971, Jerrel HARDEN accueille sur sa ferme, située dans l'Alabama, une plate-forme de démonstration sur les nouvelles techniques de conservation des sols en lien avec des sociétés de l'agrofourniture (Ortho agricultural pour les herbi-



Figure 8.1 : Le Ro-till est l'outil mis au point par Jerrel Harden. Au final, l'outil sera commercialisé par Brown puis Bush Hog à travers 33 des 50 États américains. ©Bush Hog

cides, Allis Chalmers pour le semoir mais également le Soil Conservation Service). L'idée de la journée est de montrer la mise en œuvre de la technique : application d'un herbicide total pour détruire les adventices puis semis direct immédiat. Le semis direct est très moyennement réussi sur la parcelle à l'exception d'une zone ayant bénéficié d'un sous-solage à 50 cm. Dans les sols sableux et pauvres en matières organiques des Coastal Plains, très sujets à la prise en masse compte tenu du climat océanique, cette pratique permet de casser la semelle de compaction. L'agriculteur comprend rapidement le phénomène et décide de construire un outil spécifique lui permettant de travailler uniquement le rang puisqu'aucune machine de ce type n'est proposée à la vente : le Ro-Till est né.

Aux États-Unis, le strip till est très souvent pratiqué avec des apports conjoints d'engrais, une technique dont l'intérêt a été découvert par Jim Kinsella. Au début des années 1980, cet agriculteur dont la ferme se situe dans l'Illinois, au cœur de la Corn Belt, pratique le semis direct depuis plusieurs années. Engrais et herbicides sont apportés au printemps après le semis du maïs. La réussite globale est jugée peu satisfaisante et surtout très dépendante de la pluviométrie. En 1981, le climat est à nouveau capricieux et sec après le semis, ce qui incite l'agriculteur à vouloir modifier ses pratiques pour la campagne suivante. Dès l'automne, il positionne l'ammoniac anhydre dans le sol à l'aide d'un outil à dent dont l'écartement est de 76 cm (30 pouces) alors que le maïs est semé avec un écartement entre rangs de 96 cm (38 pouces). Au printemps 1982, le climat est globalement froid et humide et l'agriculteur fait un constat troublant : il observe une grande hétérogénéité de croissance. Environ 10 % des pieds de maïs s'avèrent bien plus verts et plus développés que les autres à l'approche du stade 6-7 feuilles : ce sont ceux positionnées exactement au niveau des rangs d'application d'azote. L'agriculteur tire immédiatement la conclusion qui s'impose : en cas de printemps froid, le maïs positionné sur les passages d'azote a une croissance précoce bien plus rapide que celui situé hors des passages fertilisés. Dès lors, il adopte le travail du sol localisé et associé



Figure 8.2 : Le Parasemis permet l'implantation du maïs en un seul passage derrière une graminée fourragère. Il se compose de lames de fissuration, d'un rotasemis et d'un semoir monograine. Une trémie avant pour engrais vient éventuellement compléter l'ensemble. © Howard

à une fertilisation sur sa ferme et en fait la promotion auprès de son groupe de développement agricole. Jim et ses collègues retiennent finalement l'expression de « strip till » et font la promotion de cette technique dans différentes réunions et conférences.

Parallèlement en Europe, on vit au cours des années 1970 une profonde évolution des outils d'implantation des cultures. Les premiers semoirs à disques pour semis direct de céréales à paille apparaissent dans la première moitié de la décennie avec des machines comme le Huard SD ou le Sulky Unidrill. Quelques années auparavant, des outils animés par prise de force étaient apparus pour la simplification de l'implantation des blés derrière maïs. À défaut de vraie solution pour du semis direct strict sur cultures à fort écartement, l'idée est apparue de fraiser une bande de terre de 15 à 20 cm de largeur sur 8 à 12 cm de profondeur afin d'y planter la culture sans travail des interrangs (exemple du Rotasemis de Howard présenté au SIMA 1969). Les premiers vrais semoirs à disques pour semis direct de maïs arrivent en Europe au début des années 1980 avec le Max Emerge de John Deere.. Paradoxalement, ce sont deux outils inspirés de près ou de loin par le Rotasemis qui verront le jour peu après : le No-till de Gaspardo puis l'Ecosem de Lafforgue. A la fin des années 1980, l'augmentation de la puissance de traction autorise l'ajout des lames de décompaction de type Paraplow au Rotasemis et un semoir monograine : c'est le Parasemis de Howard. Ces ensembles étaient notamment utilisés dans l'Ouest de la France pour l'implantation rapide des maïs après des graminées ensilées (faible temps de travail requis). Au début des années 2000, des outils américains de marque Yetter ont été importés, faute d'offre en France. Les premiers vrais strip tillers européens ne sont apparus qu'au milieu des années 2000 avec des outils issus des décompacteurs (Duro France, Jammet) ou cultivateurs (Horsch). Une très forte accélération a eu lieu depuis 2010 : l'importation d'outils américains (Dawn, Orthman, Twin Diamonds) s'est développée et les constructeurs européens (Kuhn, Sly, Franquet, Carre) en proposent désormais à leur gamme. Aujourd'hui, environ 15 constructeurs proposent ce type d'outils.

Positionnement de la technique

Par le poids de l'histoire, les États-Unis ont très rapidement poussé le travail du sol dit de conservation (*conservation tillage*). Il se définit par toute forme de travail du sol qui laisse après le semis de la culture à minima 30 % de la surface du sol couverte par les résidus du précédent.

Les avantages mis en avant par les promoteurs du travail du sol de conservation sont nombreux (CTIC, 2014) : réduction du temps de travail, réduction de la consommation de carburant, meilleur état structural, augmentation du taux de matière organique, moindre évaporation de l'eau, diminution de l'érosion, amélioration de la qualité de l'eau de ruissellement, augmentation de la biodiversité et amélioration de la qualité de l'air (poussière dans l'air, moins de pollution avec échappement, stockage du CO₂).

Le *conservation tillage* comprend plusieurs techniques :

- le semis direct *stricto sensu* ;
- le strip till ;
- le travail du sol vertical (*vertical tillage*) : peut inclure du décompactage sans bouleversement des horizons et/ou du travail du sol superficiel sans enfouissement des résidus de culture ;
- le travail du sol sur billons permanents (*ridge till*) : consiste à faire des billons pour l'implantation des cultures. Aucun travail n'intervient entre la récolte et le semis. Ce dernier se réalise en décapant quelques centimètres de terre sur l'extrémité du billon. Décapés lors du semis, les billons sont reconstitués en cours de culture par la reprise de la terre.
- le mulchage (*mulch till*) : consiste à travailler superficiellement le sol sans enfouissement des résidus de récolte. La différence avec le vertical tillage est très faible, cette dernière ayant surtout une connotation commerciale.

Si l'on examine maintenant la technique strip till avec une vision plus européenne, on peut la caractériser selon les modes d'actions qui lui sont associés et ainsi la classer par rapport aux autres techniques de travail du sol existantes.

Le résultat agronomique après passage d'un outil de strip till se caractérise par une distinction entre deux zones. Sur la bande travaillée, environ 15-20 cm de large, on a un travail du sol assez intensif (enfouissement des résidus, affinement du sol, mélange des horizons). *A contrario*, l'interrang n'est absolument pas travaillé (résidus laissés en surface, pas de terre fine créée). De par sa combinaison de travail intensif et de non-travail, les producteurs peuvent s'y intéresser, qu'ils se trouvent dans une démarche de simplification de travail du sol ou, au contraire, de réintensification du travail du sol après des échecs en semis direct. L'enquête menée par Guil en France en 2011 (Brun *et al.*, 2012) auprès d'une quarantaine d'utilisateurs de la technique montre que les trois quarts d'entre eux étaient dans une trajectoire de simplification, les autres étant précédemment en semis direct.

Généralement, les agriculteurs pratiquant la technique strip till travaillent sur une profondeur comprise entre 15 et 20 cm (les profondeurs plus importantes sont possibles mais plus gourmandes en carburant, la bande de terre peut être plus motteuse et le sol souvent moins friable). Entre les bandes de terre travaillée, les

interrangs sont plus ou moins larges (selon l'écartement entre dents, cette valeur varie de 45 à 80 cm) et peuvent comporter les résidus du précédent ou les résidus de la culture intermédiaire.

Toutes les pièces travaillantes d'un élément ont une fonction précise permettant le travail du sol en bandes (figure 8.3).

6



Dans le sens d'avancement, on trouve successivement :

- Couteau circulaire (1) En faisant une découpe de quelques cm, il permet de couper les débris végétaux longs afin d'éviter le bourrage de l'élément mais cela sert également d'amorce au travail de la dent qui se trouve dans le même axe en retrait.
- Roue pour suivi des dénivellations du terrain (2) Elles permettent de faire un point d'appui pour l'élément qui, via le parallélogramme, va pouvoir épouser le terrain et ainsi autoriser un travail à profondeur constante pour tous les éléments.
- Chasses débris (3) Leur mission est de pousser de part et d'autre du rang les débris végétaux libres afin de pouvoir faire une bande de terre propre. Leur rôle est fondamental mais leur réglage assez délicat : pas assez agressif, la bande n'est pas suffisamment dégagée et trop agressif la bande est certes dégagée mais creusée en raison de la terre projetée en interrang.
- Dent (4) Elle fait le gros du travail en permettant la fissuration et le mélange des horizons. Selon sa forme, le mélange sera plus ou moins important alors que la fissuration est toujours réalisée. Réglable en profondeur, elle peut éventuellement être remplacée par un module de reprise superficielle (dents vibrantes, disques gaufrés).
- Disques de canalisation (5) En canalisant la terre projetée par la dent, ils permettent de conserver la terre sur la future bande évitant ainsi les projections dans l'interrang. Leur réglage détermine les dimensions de la bande de terre souhaitée en termes de hauteur et de largeur.
- Éléments de rappui (6) Ils terminent le travail en émiettant et rappuyant la bande de terre. Leurs formes peuvent être variables selon les objectifs recherchés : maintien de l'humidité, réchauffement de la partie superficielle de la terre.

Figure 8.3 : Aperçu d'un élément pour strip till avec les différentes pièces travaillantes.
© Sly France



Figure 8.4 : Aperçu du travail en strip till avant l'implantation d'un colza. L'écartement entre les bandes de terre est de 50 cm, le précédent est une céréale avec les pailles restituées et broyées. © ARVALIS Institut du végétal. Damien Brun



Figure 8.5 : Aperçu du travail en strip till avant l'implantation d'un maïs. L'écartement entre les bandes de terre est de 80 cm, les interrangs comportent en majorité les résidus de la culture intermédiaire. © ARVALIS - Institut du végétal. Damien Brun

Les cultures concernées par la technique strip till

Comme nous l'avons préalablement expliqué, la technique strip till ne travaille pas toute la surface du sol mais uniquement des bandes de terre et tout l'intérêt réside dans le semis de la culture sur la bande travaillée. Pour des éléments de strip till de construction classique (figure 8.3), l'écartement minimum est souvent de 45 cm entre rangs pour éviter le bourrage des résidus entre les rangs. Il existe toutefois des constructions plus épurées où l'écartement minimum entre bandes travaillées est d'environ 35 cm.

Les cultures que l'on peut conduire en strip till doivent respecter les impératifs ci-dessus en termes d'architecture du peuplement : seules les cultures supportant

les forts écartements sont possibles. Les principales cultures sont donc (liste non exhaustive) : maïs, colza, tournesol, betterave sucrière, soja, sorgho, féverole.

Le cas des céréales à paille est plus complexe. Classiquement, l'écartement entre lignes standard (compris entre 12 et 17 cm) rend impossible un travail du sol localisé qui deviendrait dès lors un travail sur 100 % de la surface du sol. Par contre, certains constructeurs étrangers notamment britanniques ont développé des machines avec un travail en bande tous les 35 cm afin de rendre l'outil polyvalent (colza, féverole et céréales à paille). Avec ce type de matériel, les céréales sont semées en bande de 10 à 15 cm de large pour permettre une couverture du sol correcte. Toutefois, l'intérêt agronomique d'un travail profond pour une céréale à paille n'est pas déterminant hormis en situation d'hydromorphie.

Résultats d'essai

Depuis 2010, Arvalis - Institut du végétal teste la technique du strip till pour l'implantation du maïs. Trois sites expérimentaux (situés en régions Rhône-Alpes, Pays de Loire et Centre) ont accueilli les essais sur trois années consécutives dans des systèmes de production et contextes pédoclimatiques bien différents.

Démarrés en 2010, les essais de Lyon Saint-Exupéry (figure 8.6) ont testé l'effet sur le rendement du maïs grain et ses composantes de trois techniques de travail du sol : labour, travail simplifié superficiel et strip till (4 parcelles distinctes pour

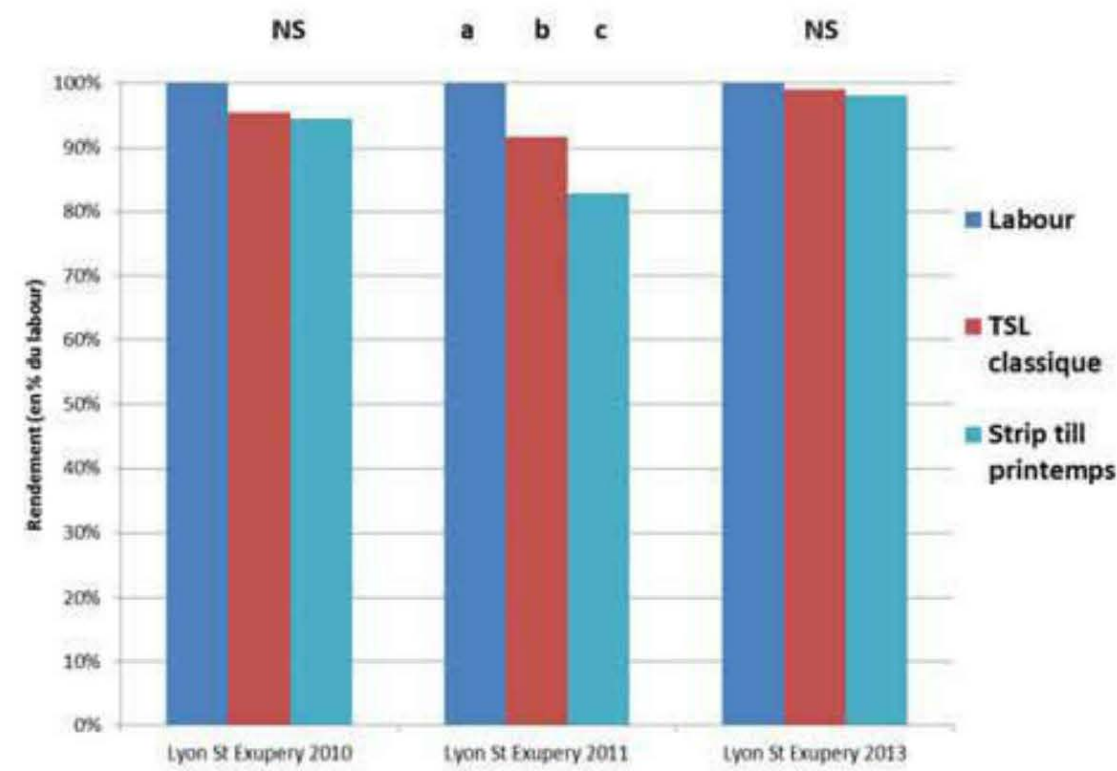


Figure 8.6 : Rendement relatif du maïs sur maïs à Lyon Saint Exupéry (69) pour les années 2010 à 2013. (Les lettres correspondent - par site - aux groupes de Newman Keuls 5 % pour les 3 techniques de travail du sol. NS = non significatif). La modalité de référence représentée par le labour présente un niveau de rendement qui varie entre 130 et 155 q/ha à 15 % selon les années.

les différentes années). Les sols sont légers et caillouteux de type alluvion fluviogla-
ciaires et ils se travaillent courant printemps lorsque les terres sont correctement
ressuyées. Dans ce type de sol facile à travailler, l'émiettement réalisé par le strip
till est généralement suffisant pour la culture du maïs.

En général, le semis se fait peu de temps après le passage du strip till. Mais en
2011, le semis n'a pu se faire qu'après 7 semaines en raison des précipitations
abondantes. Les rendements sont logiquement impactés en 2010 et 2011 par des
manques à la levée qui ont pu aller jusqu'à 10 %, expliquant les différences de
production (pas toujours significatives). La raison des pertes à la levée réside en
grande partie dans le mulchage réalisé post-récolte avant les maïs 2010 et 2011 et
qui, compte tenu du mélange terre – débris végétaux, ne permet pas d'obtenir une
ligne de semis totalement dégagée de débris végétaux. Qui plus est, pour l'année
2011, au mulchage s'est ajouté un travail avec le strip till non parallèle aux rangs
de maïs de l'année précédente, provoquant d'importantes cavités sur la ligne de
semis.

La leçon a été retenue et le mulchage a été stoppé pour les années 2012 et 2013
(des dégâts de corbeaux survenus en 2012 après la levée rendent impossible l'ana-
lyse des résultats de cette campagne). Le maïs 2013 n'a pas subi d'événements
majeurs susceptibles de perturber sa croissance : les rendements des différentes
techniques sont statistiquement identiques.

La compaction des sols causée par les différents passages (pressage et ramassage
des pailles, épandage des effluents), l'enfouissement des effluents organiques et le
précédent prairie délicat à gérer sont des problématiques spécifiques des systèmes
de polyculture élevage. Toutes ont été étudiées durant les 3 années consécutives

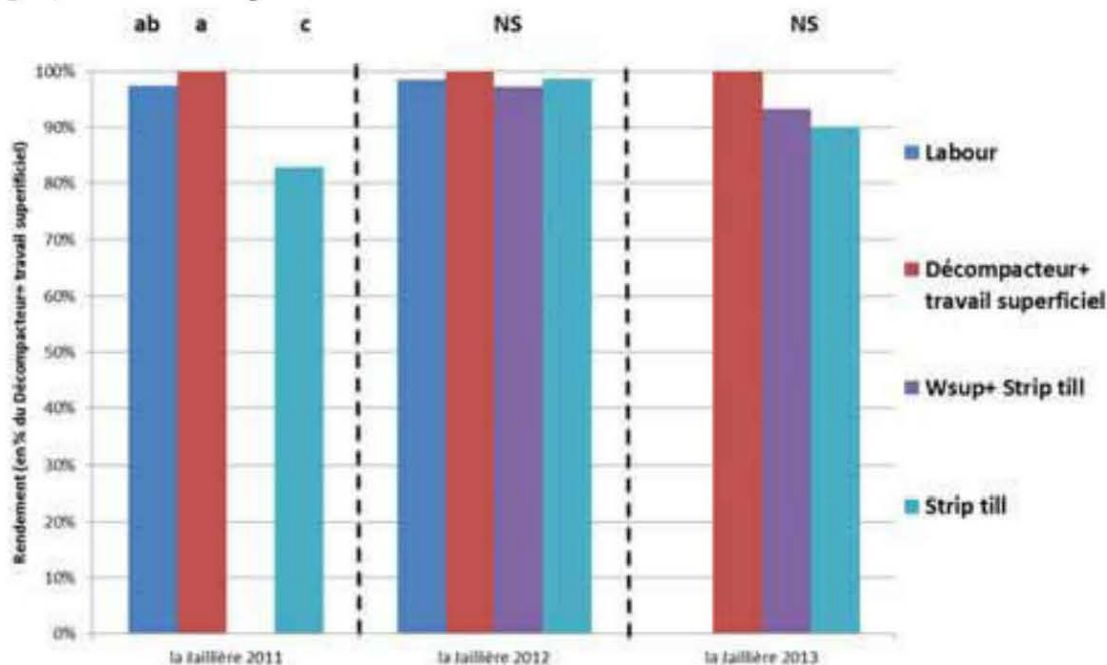


Figure 8.7 : Rendement du maïs ensilage à la Jaillière (44) pour les années 2011 à 2013. La modalité de référence est constituée d'un travail de fissuration suivi d'un passage d'outil classique à disques. (Les lettres correspondent - par site - aux groupes de Newman Keuls 5 % pour les 3 techniques de travail du sol. NS = non significatif)

d'essai sur la station expérimentale de la Jaillière. Les sols sont des limons sur schiste qui se travaillent au printemps peu de temps avant le semis du maïs. L'essai de 2011 a été mis en place sur un précédent prairie temporaire de 3 ans détruite un mois avant le semis avec du glyphosate. Le fait le plus marquant a concerné la modalité strip till où deux passages ont été nécessaires pour réaliser des bandes de qualité convenable. Le semis qui a suivi s'est fait avec des éléments semeurs légers à socs si bien que le rappui insuffisant a pénalisé les levées en strip till. En ajoutant à des levées moyennes des symptômes de carence en phosphore dû à un sol creux, le rendement ne pouvait qu'être nettement en retrait par rapport aux techniques de référence. Les essais de 2012 et 2013 viennent après précédent céréales suivi d'un couvert végétal de type mélange graminées et légumineuses. Sur ce précédent plus facile à gérer, l'utilisation d'un semoir monograin plus lourd et à disques a permis d'obtenir des rendements statistiquement identiques entre modalités, la modalité de référence se situant entre 10 et 15 tonnes de matière sèche/ha.

Le troisième et dernier essai concerne un maïs grain inséré dans une rotation céréalière. Celui-ci se positionne très souvent après une céréale suivie d'un couvert végétal pendant l'interculture. Ces essais ont été réalisés pendant trois années consécutives sur la station expérimentale de Boigneville ou dans les proches environs (Gollainville). Les sols sont de type limons argileux sur calcaire d'une profondeur maximale de 80 cm. Dans ce type de système céréalier, la paille est généralement broyée puis restituée au sol limitant par là même les passages dans les parcelles. De plus, le sol sèche suffisamment pendant la période estivale pour permettre une fissuration satisfaisante. Le travail de décompaction y est rarement indispensable, y compris pour des cultures très exigeantes comme le maïs. Plusieurs variantes du strip till ont été introduites dans les expérimentations, avec divers outils à dents

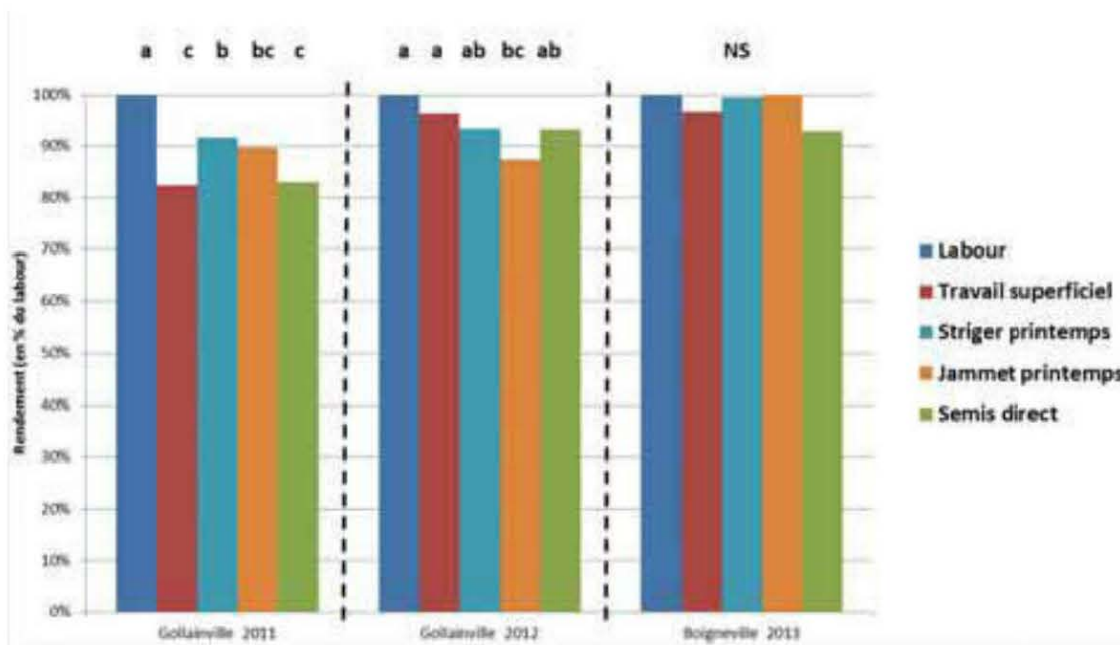


Figure 8.8 : Rendement du maïs grain à Boigneville (91) ou Gollainville (45) pour les années 2011 à 2013. Le rendement brut a, pour sa part, progressé en passant de 122 à 130 q/ha à 15 %. Les lettres correspondent - par site - aux groupes de Newman Keuls au seuil de 5 % pour les 3 techniques de travail du sol (NS = non significatif).

(Striger de Kuhn, ameublisseur localisé de Jammet). Enfin, une modalité en semis direct fait également partie des modalités afin de pouvoir comparer les différents strip till à la technique la plus extrême. Après une première année 2011 de mise en route, les résultats apparaissent stables entre années : le strip till, quel que soit l'outil, conduit à des rendements statistiquement identiques à ceux observés avec la technique de référence qui est le labour. On notera également que ces rendements sont juste supérieurs à ceux obtenus en semis direct.

La première année d'essais s'est révélé globalement délicate pour les différents sites expérimentaux : précédent cultural difficile à gérer, semoir à maïs trop léger, défaut de contact sol/graine conduisant à un peuplement trop limitant,.... Avec un peu plus de pratique et une meilleure maîtrise, on a été capable d'obtenir des niveaux de productivités équivalents aux autres techniques de travail du sol.

Encadré 8.1

L'expérience de Yoahn DELAGE, agriculteur à Pranzac (16)

Agriculteur à l'est d'Angoulême dans le département des Charentes, Y. DELAGE utilise la technique strip till depuis quatre années. L'assolement est principalement composé de maïs grain irrigué (117 ha dont 90 % en monoculture) mais également de blé, tournesol et colza ou orge pour une surface de 60 ha.

Ce sont en tout premier lieu des considérations économiques qui l'entraînent à s'intéresser à la technique strip till. En effet, les terres de sa ferme se composent de deux îlots principaux, distants de 40 km l'un de l'autre entraînant par là même un temps de transport relativement important. En parallèle, l'implantation du maïs est réalisée de façon classique se traduisant donc par un temps de travail élevé et des coûts importants : labour suivi de plusieurs reprises de vibroculteur puis d'un andainage et broyage de pierres sur la moitié de la surface tous les ans. En effet, les terres sont essentiellement des groies superficielles à moyennes avec quelquefois la roche mère affleurante. La mise en œuvre de la technique strip till a permis des gains relativement importants sur le temps de travail (de -64 à -81 %) et sur la consommation de carburant (de -66 à -75 %) lors de l'implantation des cultures (tableau 8.1).

Y. DELAGE a commencé le strip till lors de l'hiver 2009 consécutivement à une récolte qui s'était déroulée dans de bonnes conditions de portance des sols. Le travail réalisé était satisfaisant voire presque trop affiné mais il était quasi impossible de limiter l'émiettement de la bande de terre. Avec le recul de plusieurs années d'utilisation, le travail d'automne doit intervenir juste après la récolte

Tableau 8.1 : Gains observés lors du changement de mode du travail du sol

	Maïs : Labour(1) ► Strip till (2)	Colza & Tournesol : TCS (1) ► Strip till (2)
Temps de travail* pour (1)	2.44h/ha	0.7h/ha
Temps de travail * pour (2)	0.46h/ha	0.25h/ha
Différence en %	-81%	-64%
Consommation de carburant * pour (1)	65.2l/ha	26.2l/ha
Consommation de carburant * pour (2)	16l/ha	9l/ha
Différence en %	-75%	-66%

(Source : Y DELAGE)

* : ne comprend que les opérations de travail du sol

(texture argileuse) et doit permettre la réalisation d'une bande de terre propre, légèrement grossière tout en évitant les projections de terre dans l'interrang. Pour y parvenir, la vitesse de travail se situe autour de 8 km/h, la profondeur de travail entre 15 et 18 cm avec les éléments de rappui esquivés.

Le gel hivernal va permettre de faire évoluer la bande travaillée avec les alternances gel/dégel et humectation/dessiccation. Lors du printemps, une reprise superficielle peut être faite mais de façon non systématique selon les conditions hivernales.

Le passage superficiel de printemps avec le strip tiller est essentiellement motivé par l'apport de DAP (diammonium phosphate ou 18-46), un engrais starter solide, puisque le semoir monograin ne possède pas l'équipement adéquat. L'opération de semis proprement dite est réalisée avec un matériel classique disposant d'un enterrage à l'américaine et d'une mise en terre avec un double disque. Le semoir a le même nombre de rangs que le strip tiller soit 8 rangs ou 6 m. En termes de conduite phytosanitaire, une application d'herbicide non sélectif a été réalisée avant semis les deux premières années. Là encore, avec un peu de recul, la disparition des chardons, rumex, datura,... a permis de supprimer le glyphosate avant semis et le désherbage du maïs a évolué : suppression des herbicides de prélevée au profit d'application en postlevée. À la question de la localisation d'herbicides racinaires lors du semis, Y. Delage admet que ce serait « judicieux » et certainement nécessaire mais représenterait également une complexification de l'itinéraire, difficile à gérer.

D'après l'expérience et le recul des quatre années de strip till, Y. Delage estime que le niveau de productivité du maïs est équivalent au labour qu'il pratiquait antérieurement. Il signale par contre un développement de la culture un peu différent de la conduite labour : plus lent jusqu'au stade 6 à 8 feuilles puis rattrapage par la suite pour aboutir à une date de floraison identique.

Tout au long de ces quatre années de strip till, Y. Delage a amélioré ses pratiques suite à des observations ou par anticipation de problèmes éventuels. Un des talons d'Achille du strip till en monoculture de maïs réside dans le tassement de sols eu égard aux dates de récoltes. Conscient des limites de la machine, l'exploitant a préféré faire du préventif plutôt que du curatif en diminuant les indices de précocité des variétés de maïs cultivés pour s'assurer des récoltes moins tardives et pénalisantes pour la structure du sol, et en choisissant une moissonneuse-batteuse plus légère à l'occasion de son renouvellement. Pour rester dans le volet matériel, le nouveau tracteur a été choisi avec un autoguidage GPS pour un plus grand confort de travail. Même si l'autoguidage n'est pas indispensable pour faire du strip till, il constitue un plus indéniable pour le chauffeur. Les pneumatiques basses pressions du tracteur de départ ont été remplacées par des pneus jumelés étroits dits « row crop » sur le nouveau tracteur. Y. Delage précise que lors du travail, un léger patinage suffit à malaxer la terre et les résidus de culture sur 3 à 4 cm. Les bandes de terre résultantes sont visuellement moins satisfaisantes (plus de résidus, plus de mottes). Enfin, des brises chaumes équipent désormais le cueilleur à maïs : il s'agit de plaques qui permettent de casser les souches de maïs par simple pression contre le sol. Ceux-ci permettent de protéger les pneumatiques des différents engins tout au long de la saison (moissonneuse-batteuse batteuse, tracteur, semoir).

Colza et tournesol sont également conduits en strip till avec le même écartement entre rangs que le maïs soit 75 cm. Ces cultures sont installées sur les terres les plus superficielles où il n'y a pas d'irrigation. Elles arrivent toutes les deux après une céréale à paille avec des résidus broyés et restitués. Pour le colza, le travail de strip till est réalisé dès la mi-juillet avec localisation de phosphore alors que le semis n'intervient pas avant début septembre dans la région. Afin d'éviter tout phénomène d'érosion de la bande de terre en cas d'orage, l'agriculteur procède aux



Figure 8.9 : En monoculture de maïs, la réussite de la technique strip till passe par un décalage d'un demi-rang tous les ans. (© Y. Delage)

réglages lui permettant d'obtenir une légère butte. Après semis, le sol a retrouvé sa planéité et les semences sont positionnées au contact de l'humidité. Cela permet par conséquent une bonne mise en place de la structure de peuplement, étape d'autant plus importante que la densité est optimisée (19 grains/m²). En dépit du fort écartement, la couverture du sol est totale dès la fin de l'automne si bien que l'interrang reste propre au printemps lors de la reprise de végétation. Le rendement final de 4 t/ha se situe dans la fourchette haute de l'année. Le tournesol ne pose aucune difficulté spécifique en strip till : la levée est régulière et la culture très homogène dans les différents stades et ce jusqu'à la récolte. Implantées en semis direct, les céréales qui suivent le colza ou le tournesol ne présentent aucune



Figure 8.10 : Très bon travail d'automne : légère butte de terre avec quelques mottes, débris chassés de la ligne, pas de projections de terre dans l'inter rang qui pourraient y favoriser des levées d'adventices. (© Y. Delage)



Figure 8.11 : Le passage au strip till s'est fait progressivement. Dans ce cas, une parcelle est déjà conduite en strip till alors que l'autre est encore labourée. Les deux montrent une même régularité et homogénéité (© Y. Delage)

visualisation des bandes travaillées pour la culture précédente malgré l'apport localisé d'engrais avec le strip till. Aujourd'hui, Y. Delage intègre de plus en plus le strip till dans une démarche agronomique globale avec, par exemple, la localisation des couverts végétaux sur la future bande de semis.



Figure 8.12 : Colza implanté en strip till avec un semis à 19 grains/m² et 75 cm d'écartement entre rangs. Au début du mois de novembre, la couverture du sol est totale. (© Y. Delage)

Références bibliographiques

- Brun D., Labreuche J., Guil J., 2012. Implantation : Strip till mode d'emploi. *Perspectives Agricoles*. N° 387. pp 18-25.
- Brun D., Ray T., Légère R., Authier A., 2013. Strip till : Une technique efficace sur maïs si elle est bien positionnée. *Perspectives Agricoles*. N° 399. pp 12-16.
- Brun D., Ray T., Légère R., 2013. Strip till : des améliorations possibles en pensant autrement l'itinéraire du maïs. *Perspectives Agricoles*. N° 399. pp 17-20.
- Brun D., Légère R., Boillet P., 2014. Adapter son matériel des trip till pour être plus efficace. *Perspectives Agricoles*. N° 411. pp 72-76.
- Brun D., Légère R., Authier A., Gobillot A., 2014. Strip till : Les enseignements de dix essais. *Perspectives Agricoles*. N° 412. pp 51-55.
- Licht M.A., Al Kaisi M., (2005). Corn response, nitrogen uptake and water use in strip-tillage compared with no-till and chisel plow. *Agronomy journal*, n°97, pp.705-710
- Licht M.A., Al Kaisi M., (2005). Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, n°80, pp.233-249
- Little C.E. (1987). Green fields forever : the conservation tillage revolution in America. *Island press, Washington DC, Covelo California*. 192p
- Vyn T.J., Raimbault B.A., (1992). Evaluation of strip tillage systems for corn production in Ontario. *Soil and Tillage Research*, n°23(1-2), pp.163-176

Le semis direct sur couverture végétale permanente

J. LABREUCHE, S. JEZEQUEL, D. BREMOND

Le semis direct sur couverture végétale permanente combine des implantations sans travail du sol, une couverture permanente des sols et une rotation culturale diversifiée. Il s'agit d'un système de culture à part entière où l'agronomie, le sol et les couverts végétaux sont placés au cœur des réflexions.

Le semis direct est une technique d'implantation des cultures qui repose sur un travail du sol localisé à la ligne de semis effectué par les éléments semeurs, sans travail entre les rangs semés ou en profondeur. La semence est positionnée par les éléments semeurs dans un sol non travaillé. L'action mécanique de placement des semences est effectuée le plus souvent par des semoirs équipés de disques ou plus rarement de dents, voire par du semis à la volée (semis sous la barre de coupe...).

Le semis direct sous couvert correspond au semis d'une culture avec perturbation minimale du sol dans des résidus végétaux abondants, qui peuvent provenir d'un couvert végétal encore vivant au moment du semis de la culture, ou de résidus d'un couvert détruit à l'avance ou encore des résidus de la culture précédente en cas d'intercultures courtes. C'est donc une forme de semis direct où la couverture du sol est maximisée et permanente. Cependant, dans la plupart des cas, les couverts sont annuels et détruits avant ou juste après le semis de la culture de vente. La couverture du sol est permanente, même si l'on n'implante pas forcément de couverts pérennes.

Le semis direct sur couverture végétale permanente vise trois objectifs conjoints (Seguy *et al.*, 2012) :

- une perturbation minime du sol (3 à 10 % de la surface) ;
- une couverture permanente du sol, morte ou vivante, selon les périodes ;
- de fortes restitutions de carbone au sol issues d'une succession de cultures et de couverts diversifiés.

Ces trois piliers des semis directs sur couverture végétale permanente ont été repris dans le concept d'agriculture de conservation, même si ce dernier est moins exclusif car il tolère un travail du sol réduit laissant au moins 30 % de la surface

couverte par des résidus après semis. En fonction des conditions pédoclimatiques et des choix des agriculteurs, la mise en œuvre de ces techniques est très variable en termes de pratiques. Un tel système de culture a plusieurs conséquences ou objectifs : un sol protégé en surface et bien prospecté au niveau racinaire, une activité biologique intense, une diversité de cultures et couverts assurant une gestion intégrée des ennemis des cultures, des entrées d'azote dans le système grâce aux légumineuses. L'absence de travail du sol ne permet pas de gérer avec autant de facilité qu'avec un travail profond du sol certaines erreurs dans le pilotage du système de culture (répartition de résidus de récolte, désherbage, tassement des sols...). L'anticipation, la réflexion et la technicité sont nécessaires. La prise en compte du sol et des bénéfices écosystémiques des couverts végétaux est également au cœur des réflexions. Il s'agit d'un raisonnement à l'échelle du système de culture et non à l'échelle d'une culture, en intégrant de nombreux paramètres (agronomie, matériel, économie...).

La gestion des résidus végétaux

La présence de résidus végétaux abondants à la surface du sol est une caractéristique des semis directs sur couverture végétale permanente. Ce mulch a plusieurs conséquences positives : protection de la surface du sol, réduction de l'évaporation de l'eau, limitation de la levée des adventices. Il peut cependant constituer une gêne lors du semis, en particulier si les résidus sont abondants, lignifiés ou mal répartis. Les éléments semeurs à disques peuvent enfoncer des résidus dans la ligne de semis, limitant ainsi le contact sol-graine (figures 9.1 et 9.2). Dans ce cas, l'ajout de chasse-débris sur le semoir peut être un plus. On cherchera à anticiper en amont du semis la gestion des résidus. À la récolte, on privilégiera

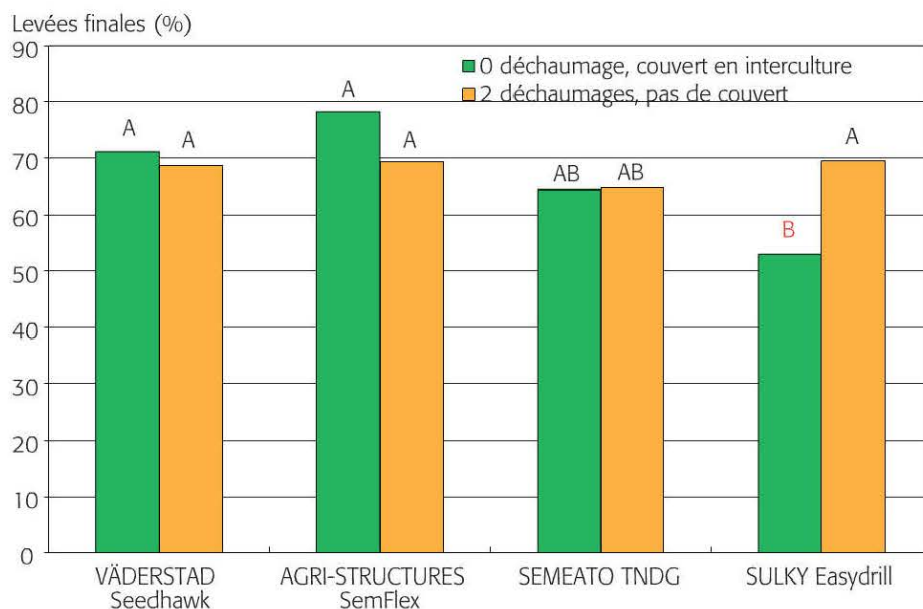


Figure 9.1 : Comparaison de la levée d'une orge d'hiver selon différentes techniques d'implantation sur un précédent blé dont les pailles restituées n'étaient pas bien réparties. Boigneville 2008-2009. Les groupes de Newman Keuls au seuil de 5% sont indiqués.

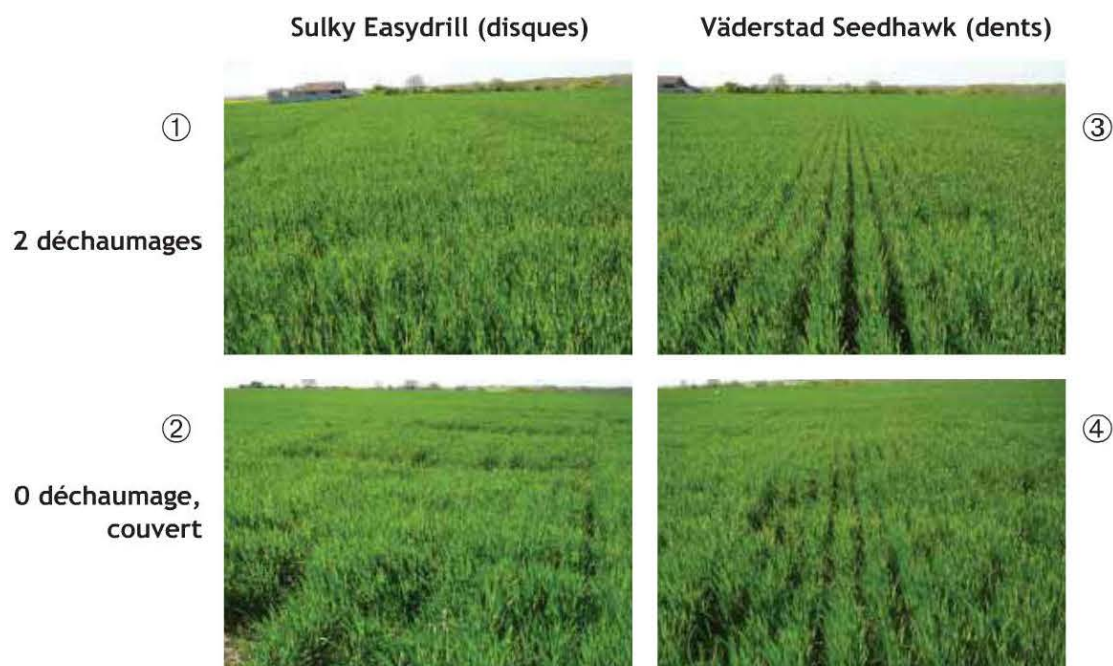


Figure 9.2 : Croissance d'une orge d'hiver selon différentes techniques d'implantation sur un précédent blé dont les pailles restituées n'étaient pas bien réparties. Boigneville 2008-2009. On pourra noter l'hétérogénéité de l'orge en particulier en semis direct avec le semoir à disques (photo 2). (© J. Labreuche).

une fauche assez haute et une absence de rebroyage des résidus (ou de broyage sous becs), afin de limiter la création d'un matelas végétal au sol qu'il est par ailleurs difficile de bien répartir sur des moissonneuses ayant des largeurs de coupe élevées. Équiper la moissonneuse d'un éparpilleur de menues pailles performant est indispensable. Certains privilégient aussi la moisson aux heures où la paille est bien sèche et se répartit mieux. De ce point de vue, la gestion des couverts végétaux présente moins d'enjeux car ces derniers sont peu lignifiés par rapport aux résidus de récolte et sont donc moins gênants. Si le broyage des résidus avant le semis est déconseillé dans le cas de semoirs à disques, il peut être utile avant l'usage d'un semoir à dents, plus apte à placer les semences en contact avec le sol plutôt qu'avec les résidus (figures 9.1 et 9.2). Mais il est aussi plus sensible au bourrage par des résidus végétaux, en particulier s'ils sont longs et non ancrés au sol. Le broyage post-semis a aussi été expérimenté avec succès par Arvalis à Boigneville dans le cas de semis direct avec un semoir à disques derrière un maïs grain irrigué (tableau 9.1). En l'absence de broyage, les résidus très abondants sur les anciens

Tableau 9.1 : Rendement et teneurs en Désoxynivalénol (DON) d'un blé tendre d'hiver implanté derrière un maïs grain. Essai de longue durée de Boigneville. Période 2007 à 2013 (sauf 2010 et 2011 pour le DON car trop peu touchées). Les groupes de Newman Keuls au seuil de 5% sont indiqués entre parenthèses.

	Broyage Labour, herse rotative+semoir	Broyage Rotavator +semoir	Sémavator	Semis direct	Semis direct Broyage
Rendement (q/ha)	87.7 (a)	87.5 (a)	84.2 (a)	79.0 (b)	84.5 (a)
DON (% du témoin labour)	100 (b)	134 (b)	232 (b)	504 (a)	199 (b)

rangs de maïs ont pénalisé la levée et le développement du blé. Le peuplement, hétérogène, subit une perte de rendement significative par rapport au labour ou au travail superficiel (Labreuche et Closset, 2012). Le broyage après le semis a été expérimenté pour tester son impact sur les mycotoxines. Il s'est avéré très efficace en réduisant les teneurs en désoxynivalénol (DON). Le broyage des résidus de maïs accélère leur décomposition et réduit la contamination des épis de blé par des ascospores de *Fusarium*. Il a aussi une action intéressante de répartition plus homogène des résidus à la surface du sol, ce qui s'est traduit par un peuplement de blé plus régulier et des rendements statistiquement équivalents à ceux enregistrés avec des techniques traditionnelles. La gestion des pailles étant complexe, certains agriculteurs modifient leur rotation afin d'implanter les cultures les plus délicates à faire lever en semis direct derrière d'autres précédents que les céréales à pailles. Cela est évoqué dans le chapitre 2 concernant les conditions déterminantes de mise en œuvre des différentes techniques (cas des colzas implantés derrière un protéagineux, des orges d'hiver derrière colza ou des tournesols derrière sorgho).

Un équilibre structural fragile

Le chapitre 3 résume les phénomènes contradictoires qui opèrent dans les systèmes de culture en semis direct. En surface, la structure est stabilisée à moyen ou long terme : protection de la surface du sol, matière organique plus concentrée dans les premiers centimètres de surface, absence de fragmentation des agrégats. Cependant, en profondeur, le sol peut être tassé, en particulier lors des semis de printemps ou des récoltes d'automne. L'activité biologique (faune du sol mais aussi racines) est alors à même de recréer de la porosité mais son activité est assez lente (2 à 4 ans). Les sols argileux (grossièrement contenant plus de 18 % d'argile) plus aptes à se fissurer en été, sont à même de retrouver une bonne porosité après un tassement, plus rapidement que dans les sols limoneux.

Pour préserver la structure, il faut, en système de semis direct, limiter au maximum le tassement du sol : réduction des passages d'engins lourds dans les parcelles, passages réalisés dans les meilleures conditions possibles, choix de pneumatiques adaptés. A l'étranger (Australie en particulier), le *controlled traffic farming* est principalement développé dans des systèmes de culture en semis direct afin d'y préserver de la compaction un maximum de surface. A long terme, l'entretien calcique et humique des sols est un levier indispensable dans les sols battants et naturellement acides. La couverture permanente des sols (et la colonisation racinaire associée) est un atout, en particulier dans les sols à faible stabilité structurale. Cela amène fréquemment les agriculteurs qui pratiquent le semis direct sur couverture végétale permanente à mettre en place des cultures fourragères (luzernières, porte-graines fourragères...), très bénéfiques, ou à détruire le plus tard possible leurs cultures intermédiaires, y compris avant les cultures de printemps.

Des rotations pour compenser l'absence de travail du sol

L'absence de perturbation du sol a des conséquences très contrastées sur les ennemis des cultures, en interaction avec les pratiques agronomiques mises en

œuvre sur la parcelle. Les semences d'adventices restantes localisées en surface, cela favorise les espèces à germination superficielle et à taux annuel de décroissance élevé, comme c'est le cas de nombreuses graminées (Chapitre 6). D'autres espèces tendront au contraire à être moins abondantes. Créer peu de terre fine lors du semis et avoir un mulch épais en surface est un atout pour limiter les levées d'adventices même si, *a contrario*, cette faible perturbation du sol rend le système plus dépendant des herbicides non sélectifs en interculture. Le mulch peut servir d'abri à certains ravageurs comme les limaces et peut contribuer à favoriser l'inoculum de certaines maladies. Cela a été identifié par exemple en situation de blé sur blé pour l'helminthosporiose du blé ou encore pour la fusariose sur blé derrière maïs, sorgho ou millet, avec de plus fortes attaques de ces maladies en semis direct par rapport à du travail superficiel ou du labour (Labreuche *et al.*, 2013). D'autres paramètres ont leur importance puisque certaines maladies sont, au contraire, plus virulentes sur labour. C'est le cas du piétin verse ou de la septoriose (Labreuche *et al.*, 2013). Dans le premier cas, cela pourrait s'expliquer par une modification des équilibres de la microflore du sol. Dans le cas de la septoriose, les mécanismes de contamination de feuille à feuille pourraient être modifiés par la présence d'un mulch ou par l'architecture du peuplement. La présence d'un couvert végétal en interculture peut avoir des conséquences très variées sur les ennemis des cultures, avec des effets dépendants des espèces semées et du contexte sanitaire ou rotationnel. Ce domaine est encore très mal connu et est une source de progrès potentiel dans la gestion des systèmes de culture, autant pour éviter certains mauvais choix que pour bénéficier d'effets positifs comme l'allélopathie, valorisée dans la biofumigation.

Les leviers mécaniques sont très réduits dans les systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente mais existent et sont utilisés par certains agriculteurs. Le roulage, à l'aide d'outils traditionnels comme les rouleaux Cambridge ou d'outils plus spécifiques tels les Rolo faca, a plusieurs fonctions : amélioration de la fermeture du sillon en passant un peu après le semis, perturbation temporaire de l'activité des limaces, destruction de cultures intermédiaires ou amélioration de l'efficacité d'un herbicide appliqué peu de temps après, création d'un mulch épais et plaqué au sol afin de limiter les levées d'adventices. Le cas du broyage des résidus avant ou après le semis a été évoqué précédemment. Certains agriculteurs s'autorisent parfois l'usage d'un très léger déchaumage à l'aide d'une herse qui améliore la répartition des pailles et limite la présence de limaces et campagnols.

La rotation culturale et le choix variétal sont des leviers agronomiques très importants en semis direct, en particulier pour juguler le développement de certains ennemis des cultures cités précédemment. Cette approche est indispensable pour éviter certains échecs à court ou moyen terme et limiter le recours à la protection phytosanitaire.

La destruction du couvert est un compromis

Détruire le couvert plusieurs mois avant le semis de la culture ou au dernier moment modifie profondément les conditions d'implantation de la culture. Des effets contradictoires sont inévitables et un compromis doit être trouvé, notam-

ment en prenant en compte les éléments les plus contraignants. Un couvert détruit tardivement et qui a été gelé en hiver a un effet protecteur maximal de la structure du sol vis-à-vis du climat, en particulier lorsque la stabilité structurale est faible. En revanche, le mulch épais qu'il constitue limite l'évaporation de l'eau et augmente le risque d'avoir à semer en condition de sol mal ressuyé en surface, retardant ainsi le semis ou limitant les possibilités de fermer correctement le sillon au semis (Viloingt *et al.*, 2006). Ce risque est particulièrement avéré lors de printemps humides. Certains agriculteurs voient cependant ce mulch comme un moyen d'éviter à la terre de coller aux éléments semeurs. Ils portent une grande attention à l'équipement du semoir monograine afin de parfaire la fermeture du sillon par exemple à l'aide de roues crantées de fermeture.

La pression de certains ravageurs est parfois plus forte dans des cultures intermédiaires détruites tardivement au printemps. C'est en particulier le cas des limaces ou des campagnols qui y trouvent abri et nourriture (figure 9.3). Leur présence ou leur activité peuvent être réduites en détruisant plus tôt les couverts, de manière à avoir des conditions de milieu moins favorables. Des effets inverses sont cependant parfois observés puisque les limaces peuvent être actives sur des couverts encore verts sans s'attaquer à la culture, contrairement à des situations où le couvert est détruit tôt et où les limaces s'attaquent à la culture, seule source de nourriture dans la parcelle.

Dans l'essai travail du sol de Boigneville, une comparaison entre sol nu et culture intermédiaire est en place depuis la campagne 2001-2002 en rotation maïs grain/blé (figure 9.3). Le couvert était composé d'avoine d'hiver les premières années

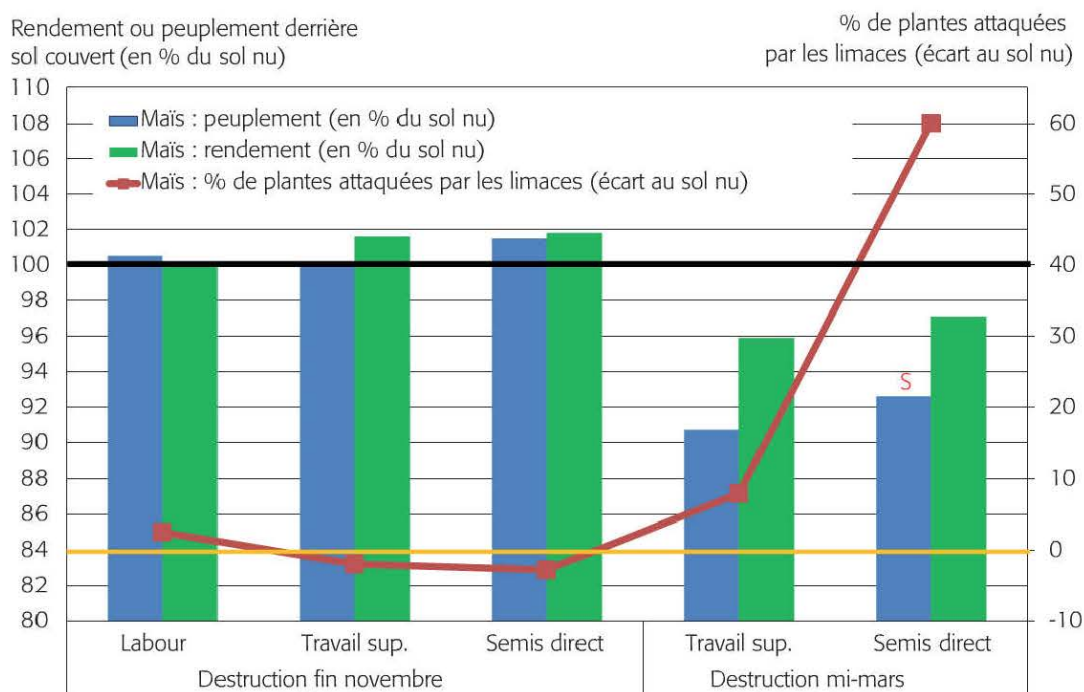


Figure 9.3 : Comparaison d'un semis sur couvert végétal à un sol nu pour trois techniques d'implantation de la culture et deux dates de destruction du couvert. Essai sur maïs grain, précédent blé, à Boigneville. Résultats moyens des campagnes 2001-2002 à 2012-2013 (2004 pour les mesures sur limaces). L'écart statistiquement significatif au seuil de 5% (Newman Keuls) avec le sol nu est indiqué par un « s ».

puis d'associations avoine + légumineuse puis moutarde + phacélie + légumineuses. Pour les trois techniques d'implantation (labour, travail superficiel, semis direct), la présence de culture intermédiaire détruite fine novembre n'a eu que très peu d'impact sur la levée et le rendement du maïs. En revanche, pour les couverts détruits en moyenne mi-mars, on peut noter un léger effet négatif sur la levée du maïs et son rendement. Cela peut s'expliquer principalement par des dégâts un peu plus élevés de ravageurs (limaces, campagnols, oiseaux) lors de la levée. Les défauts de levée et l'éventuelle organisation de l'azote par le couvert détruit tardivement peuvent expliquer les écarts de rendement.



Figure 9.4 : Maïs implanté en semis direct sous couvert sur un précédent blé (© J. Labreuche)



Figure 9.5 : Les principaux écueils rencontrés en semis direct sous couvert sur les cultures de printemps sont une mauvaise fermeture du sillon ou une forte pression de certains ravageurs. (© J Labreuche)

La date de destruction des couverts est encore à étudier. La qualité d'implantation de la culture suivante est bien sûr un impératif. De nouvelles fonctions ou usages des couverts pourront faire évoluer le système, comme la volonté de maximiser leurs impacts sur les systèmes de culture. Par exemple, maintenir vivant le plus tard possible un couvert de légumineuse non gélive éventuellement associée à une non-légumineuse gélive est susceptible d'améliorer la balance azotée pour la culture. Les couverts permanents sont une autre piste de travail où le couvert n'est pas abordé uniquement comme une source potentielle de concurrence mais aussi comme une « plante de service » (voir encadré 9.1, témoignage de Daniel Bremond).

Encadré 9.1

L'expérience de Daniel Bremond, agriculteur à Oraison (04)

Daniel Bremond pratique le semis direct sous couvert dans les Alpes de Haute-Provence dans la vallée de la Durance avec un climat méditerranéen. Ses sols sont sablo-limoneux en bordure de rivière, limoneux battants ou argilo-calcaires en bordure de colline.

À la question « faut-il travailler le sol ? », il répond « oui, c'est indispensable ». Mais au lieu de travailler ses sols avec charrue, décompacteur et beaucoup d'énergie, il a décidé de favoriser le travail par les plantes, la vie du sol et une rotation cohérente. Il considère que sans ces alliés, le semis direct ne fonctionne pas.

Il a pratiqué la culture de céréales avec labour mais le retournement du sol n'a jamais eu sa faveur. Le labour est effectivement long à réaliser et provoque la création de mottes qu'il faut ensuite reprendre avec la herse rotative. Diagnostiquant petit à petit la diminution de la fertilité de ses sols, la battance devenir de plus en plus problématique, il est passé aux techniques culturales simplifiées à partir de 1995. Avec quelques économies de temps, de carburant et beaucoup de matériel, il ne voyait pas la fertilité des sols augmenter, bien au contraire. Les sols se « refermaient ».

Il a commencé l'implantation de couverts, très difficile à réussir en techniques culturales simplifiées dans sa région, faute de pluie, car lorsqu'on travaille le sol, on l'assèche. De ce point de vue, le semis direct, en limitant le dessèchement du sol, a facilité les choses. Une nouvelle rotation plus longue a également été mise en place : maïs grain, céréale à paille puis soja en dérobé, colza semence associé à des légumineuses et couverts en interculture.

Il ne manquait plus que le semoir de semis direct. Il a alors vendu le matériel superflu (gros tracteur, charrue et matériel de préparation du sol). Cette vente des outils de travail du sol l'a obligé à mettre en œuvre des solutions agronomiques aux problèmes rencontrés plutôt que des moyens mécaniques.

Les semis directs sous couverture végétale ont démarré sur son exploitation par la mise en place de mélanges d'espèces de couvert, afin de faciliter le développement de l'activité biologique du sol, d'avoir de fortes biomasses racinaires aptes à structurer le sol, de piéger le nitrate tout en fixant l'azote de l'air avec des légumineuses présentes dans le mélange.

Le semoir pour semis direct, un John Deere 750A, permet de semer du blé directement dans le couvert végétal très développé ou sur un chaume de maïs grain non broyé. Le broyage est réalisé après le semis du blé afin d'obtenir une meilleure

répartition des résidus de maïs. Le maïs est semé avec un semoir conventionnel adapté combiné à un strip tiller ne perturbant pas trop la ligne de semis (ouverture du sol par un disque, dent fine ouvrant légèrement le sol, fertilisation organique localisée).

De gros problèmes avec la moisson par entreprise ont été rencontrés. Elle était bien adaptée au système techniques culturales simplifiées car le blé était fauché très bas et la paille broyée. Pour obtenir moins de paille au sol et une meilleure répartition, indispensable en semis direct, Daniel Bremond a investi dans une ancienne moissonneuse, plus petite et plus légère, qui lui permet de moissonner plus haut et de mieux répartir les pailles.

Un autre problème rencontré a été le choix des variétés, en particulier sur maïs. Les variétés adaptées au système conventionnel ne se sont pas montrées bien adaptées au semis direct sous couvert. Des collections de plusieurs variétés ont été mises en place. Sur maïs, de gros écarts de productivité ont été observés entre variétés.

Ensuite, Daniel Bremond a rencontré Lucien Seguy, chercheur au Cirad, qui l'a dirigé vers la technique des couverts permanents. Cela fait deux ans qu'il teste céréales à paille et maïs en association avec du sainfoin. Le but est d'avoir un couvert vivant permanent dans ces 2 cultures. À titre d'illustration, un sainfoin est semé dans du blé au mois de février avec le semoir pour semis direct. Le sainfoin se développe dans le blé dur au printemps mais ne le concurrence pas car il est encore faiblement développé. C'est plutôt le blé dur qui concurrence le sainfoin. Le couvert de sainfoin se développe bien en automne après la récolte et avec le retour des pluies. Il est alors prêt à recevoir une nouvelle céréale d'hiver ou un maïs. Le sainfoin est régulé avec de petites doses d'herbicides pour qu'il ne concurrence pas la culture (eau, azote, lumière...) tout en étant laissé vivant de façon à ce qu'il repousse après la moisson de la culture. La comparaison dans une parcelle de maïs avec ou sans sainfoin semé en août a montré un maïs plus développé en juin là il y avait du sainfoin. Deux causes seraient possibles : une meilleure structure sous sainfoin et/ou plus de fourniture d'azote par la légumineuse. Un peu plus



Figure 9.6 : Dans le système de culture de Daniel Bremond, les doubles cultures comme blé puis soja en dérobée sont fréquentes et facilitées par le semis direct, rapide et peu coûteux. (© D. Bremond)

tard, le sainfoin a fini son cycle après avoir fleuri. Il ne pousse pas alors que le maïs va croître avec l'irrigation. C'est le maïs qui concurrence la plante de service. Le sainfoin disparaît par manque de lumière. Sa croissance aura été ralentie au stade jeune du maïs par l'application de deux quarts de dose d'herbicides maïs.

D'autres couverts associés à différentes cultures sont actuellement en test sur l'exploitation de Daniel Bremond en collaboration avec Arvalis.



Figure 9.7 : En semis direct, une grande attention doit être portée à la répartition des résidus à la récolte. (© D. Bremond)



Figure 9.8 : Des couverts à forte biomasse ont été introduits dans le système de culture en SCV. (© D. Bremond)



Figure 9.9 : On peut noter ici un effet bénéfique du couvert vivant de sainfoin sur le maïs en comparaison à des zones sans sainfoin. (© D. Bremond)

Références bibliographiques

Labreuche J., Closset M., 2012. Crop yields after 41 years of no tillage and minimum tillage farming in a wheat–corn cropping system in France. *19th Triennial ISTRO Conference, September 2012, Montevideo, Uruguay*.

Labreuche J., Maumené C., Gourdain E., Couleaud G., Beauvallet G., 2013. Essai travail du sol de Boigneville : Travail du sol, précédents et maladies sont liés. *Perspectives Agricoles. N° 404. pp 30-33*.

Séguy L., Husson O., Charpentier H., Bouzinac S., Michellon R., Chabanne A., Boulakia S., Tivet F., Naudin K., Enjalric F., Chabierski S., Rakotondralambo P., Ramaroson I., Rakotondramana, 2012. Principles, functioning and management of ecosystems under Direct seeding Mulch-based Cropping systems (DMC). CIRAD-GSDM-TAFA. *Document disponible sur <http://agroecologie.cirad.fr>*

Viloingt T., Couture D., Beets B., Richard G., 2006. Semis sous couvert : La conduite de l'interculture a un impact sur les conditions de semis. *Perspectives Agricoles. N° 320. pp 38-43*.

Évaluation des stratégies de travail du sol pour des exploitations agricoles en grandes cultures

C. TOQUE, P. RETAUREAU, B. DUBOIS

Travail superficiel, travail profond, non-travail du sol, labour agronomique, outils à dents, à disques : la gamme d'équipement est large et les méthodes sont nombreuses pour accompagner l'intérêt croissant des producteurs pour les pratiques innovantes en matière de travail du sol.

On observe que les évolutions dans le type d'équipement restent souvent partielles (Agreste, 2008) : réduction de la fréquence de labour, implantation après un travail superficiel, semis direct pour planter un couvert. C'est la polyvalence des outils qui est recherchée, en vue d'optimiser la conduite de l'ensemble des cultures de l'exploitation.

Cependant, les évolutions en matière de travail du sol sont de plus en plus « intégrales ». L'exploitant choisit de concentrer son parc matériel sur un système précis : non-labour, semis direct, strip till. On entend souvent les termes de conversion, ou de transition, qui traduisent l'importante modification que cela implique pour la gestion de l'exploitation.

Quel que soit le taux de pénétration de la pratique innovante, et que ce soit dans le sens d'une simplification du travail du sol ou d'un retour à des travaux profonds, les évolutions en matière d'équipement sont guidées par un objectif principal, parmi lesquels le gain de temps sur la campagne ou à une période de l'année, la réduction des coûts de production, des économies d'énergie, la lutte contre l'érosion. Plus rarement sont mentionnées la gestion de l'enherbement, ou la réduction des risques liés aux certains pathogènes telluriques (Agreste, 2008).

L'analyse pluri-critères proposée apporte de nouvelles références pour comprendre les enjeux posés aux exploitations agricoles vis-à-vis de leur stratégie de travail du sol. Elle repose sur les pratiques réalisées sur trois micro-fermes expérimentées sur la station Arvalis de Boigneville entre 2006 et 2013 ; les modes de travail du sol (labour simplifié, techniques sans labour, semis direct), sont volontairement mis

en œuvre systématiquement au cours des campagnes successives, ce qui permet leur évaluation à long terme. Au-delà des impacts sur les performances économiques des exploitations, l'étude apporte de nouveaux éclairages sur les enjeux environnementaux associés aux choix des régimes de travail du sol.

Un essai de micro-ferme pour s'approcher du fonctionnement d'une exploitation agricole

Le dispositif des « Micro-fermes de Boigneville » est un essai pérenne qui étudie la capacité de systèmes de culture innovants à répondre à un ou des objectifs techniques, en visant à améliorer la durabilité des exploitations.

Les micro-fermes intègrent des éléments supplémentaires par rapport à des essais systèmes de culture classiques, avec le souci de se rapprocher le plus possible du fonctionnement d'exploitations de taille réelle (Toqué et Retaureau, 2013). À Boigneville, la taille des parcelles permet l'utilisation de matériel agricole courant et non de matériel expérimental. L'équipe technique organise les chantiers en considérant chaque micro-ferme comme une exploitation réelle. Selon les hypothèses choisies, on considère qu'elles disposent toutes de moyens équivalents en main-d'œuvre (2 UTH) et en équipement (valeur à neuf IVAN¹ de 700 000 €) ; chaque micro-ferme mobilisant un parc matériel spécifique.

Cinq micro-fermes sont testées depuis 1990. L'étude présentée ici concerne deux d'entre elles, « Raisonnée » et « Mach II ». Elles sont décrites selon leur objectif principal, à partir duquel a été calibré leur équipement.

- La micro-ferme Raisonnée représente une exploitation céréalière type de la région Ile de France. Les interventions techniques sont réfléchies selon un objectif d'efficience, en vue de maximiser la marge brute des cultures. L'équipement est proche des choix observés localement dans les exploitations du Gâtinais non irriguées, qui pratiquent le labour simplifié : la fréquence du labour est réduite, sans pour autant que cette opération ne soit totalement supprimée. On recourt au labour pour assainir les parcelles enherbées en vue d'une implantation de printemps, pour faciliter l'enfouissement des couverts, ou encore pour accélérer le ressuyage du sol avant semis lors des automnes humides. Cette règle de décision mène à réaliser un labour tous les deux ou trois ans sur l'essai. La micro-ferme est équipée d'une charrue et les semis sont réalisés avec un semoir combiné à une herse rotative. Le travail superficiel est assuré par deux matériels polyvalents : vibroculteur et déchaumeur à disques.

- La micro-ferme Mach II vise la maximisation de la productivité du travail (en ha/UTH). A l'image des exemples argentins, australien ou canadien, on cherche à réduire au maximum les charges de mécanisation et de main-d'œuvre à l'hectare (L'Herbier, 2014). Dans le contexte septentrional, où les charges de mécanisation et de main-d'œuvre représentent environ 40 % des charges totales (Longchamp et Pages, 2012) la gestion des cultures en Mach II doit aussi maintenir des niveaux de production élevés, élément clé de la compétitivité des exploitations. Dans

1 IVAN : montant de l'Investissement en Valeur A Neuf

cette optique, le choix en matière de travail du sol s'est porté sur les techniques simplifiées, ou techniques sans labour, qui semblent convenir aux céréales et colza (Labreuche, 2010) et par lesquelles un gain de temps semble possible. Au cours de la rotation 2006-2010, la micro-ferme a été équipée d'un semoir sur déchaumeur et d'un déchaumeur à dent. A l'automne 2010, la stratégie a été réorientée vers le semis direct et l'implantation de couverts de service : le semoir à disque est devenu l'unique outil de travail du sol. Compte tenu de l'enveloppe préétablie de 700 000 € d'IVAN pour le parc matériel, et afin de conserver les débits de chantier au semis, la micro-ferme est virtuellement équipée de 2 semoirs de 8 m. Sur la base de cet équipement sont calculés les indicateurs de performance des micro-fermes.

Des systèmes étudiés « toutes choses égales par ailleurs »

L'évaluation pluri-critères des techniques de travail du sol et semis s'est faite à partir de l'étude des performances dans les micro-fermes Mach II sur la période techniques sans labour : Mach II TSL (2006-2010), puis sur la période en semis direct avec couvert végétal : Mach II SDCV (2011-2013), en prenant comme référence le système Raisonné en labour simplifié.

Cette comparaison est rendue possible, car les micro-fermes sont expérimentées « toutes choses égales par ailleurs » :

- Conditions climatiques de type tempéré océanique à influence continentale, supposée homogène sur le dispositif de 60 ha. La pluviométrie moyenne de 1989 à 2011 sur Boigneville est de 603 mm/an, répartie de manière assez régulière au cours de l'année. L'essai n'est pas irrigué.
- Rotations pratiquées très proches, pour une durée équivalente de 4 ans. Mach II est en colza-blé tendre d'hiver – (culture intermédiaire) – Orge de printemps – blé tendre d'hiver. La rotation pratiquée dans le système Raisonné se différencie seulement par les espèces en culture intermédiaire et l'implantation de blé dur d'hiver après colza en tête de rotation. Chaque culture de la rotation est présente chaque année : ces répétitions climatiques permettent de s'affranchir des effets d'interaction espèce-année dans les évaluations réalisées (Lechenet *et al.*, sous presse). Chaque système est testé sur huit parcelles, d'une surface élémentaire comprise entre 2 et 7 ha.
- Répartition équitable des micro-fermes sur les différents potentiels de sol. La station de Boigneville est implantée sur un plateau calcaire recouvert de limons éoliens sur lequel on distingue deux grands types de sols ; des sols non calcaires profonds et moyennement profonds (50 à 60 cm) non graveleux à texture limon argileux en surface puis argilo-limoneuse au-delà de 60 cm (réserve utile de 100 mm environ), des sols calcaires minces (de 20 à 50 cm), graveleux à très graveleux de texture plus variable limono-argilo-sableuse à argilo-limoneuse (20 % d'argile, 50 % de limons avec des réserves utiles de 30 à 120 mm). Les sols de Boigneville ne souffrent pas d'hydromorphie et sont caractérisés par des vitesses de ressuyage très élevées. Au printemps, deux à trois jours sont nécessaires pour entrer sur les parcelles après un épisode pluvieux. Ces caractéristiques sont

déterminantes pour la faisabilité des différentes opérations culturales prévues dans les micro-fermes - le travail du sol et le semis d'automne entre autres.

- Conditions équivalentes en termes de capital matériel (IVAN de 700 000 €) et de main-d'œuvre. Les 2 UTH déterminent une capacité de temps de traction quotidienne maximale, qui diffère selon les périodes et les chantiers. Par convention, on considère que le semis ne peut dépasser 10 h de traction 6 jours/7 ; pour la récolte, il y a un plafonnement à 12 h/j, 7 j/7 ; les autres opérations sont plafonnées à 7 h/j, 5 j/7. Le temps total de traction ne peut excéder 50 % du temps de travail des 2 UTH en moyenne, soit 1 500 h/an.

Les résultats présentés portent sur les îlots de sols les plus profonds sur lesquels le système de culture Raisonné mobilise du labour, ce qui n'est pas le cas en sols plus superficiels. Les parcelles restent dédiées au même système d'une campagne sur l'autre permettant d'étudier certains effets à long terme, tels que la dynamique de la flore ou la structure du sol.

Une évaluation pluri-critères des techniques de travail du sol et des semis avec SYSTERRE®

Le dispositif des micro-fermes de Boigneville est consigné dans SYSTERRE®, outil développé par Arvalis - Institut du végétal, permettant de décrire de façon détaillée le système de production (matériel, main-d'œuvre, parcellaire), les systèmes de culture et les itinéraires techniques. SYSTERRE® calcule un panel d'indicateurs utilisables pour caractériser les performances des systèmes et participe à l'évaluation de leur contribution au développement durable.

Parmi la cinquantaine d'indicateurs disponibles, l'étude s'est focalisée sur 9 d'entre eux, décrits ci-dessous (d'après Berrodier et Jouy, 2010) :

- Temps de traction : temps passé dans les parcelles, par les tracteurs et engins automoteurs, dont la moissonneuse-batteuse. Intègre le temps d'approche des parcelles, les temps de manœuvre, de démarrage dans les parcelles. Mais ne considère pas le temps de gestion administrative, d'observation des cultures, etc.
- Charges de mécanisation complètes : elles tiennent compte des coûts liés à l'amortissement technique du matériel, qui représente la perte de valeur du matériel liée à son usage annuel, à sa durée de vie et à son obsolescence. L'usage annuel de l'outil dépend de l'assolement et des itinéraires techniques. Cette méthode est inspirée de celle utilisée par le Cemag (Ministère de l'Agriculture Belge, 1984). Les charges de mécanisation calculées dans SYSTERRE® intègrent également les frais financiers (montant total des intérêts d'emprunt réparti sur la durée d'amortissement du matériel), l'entretien et la réparation du matériel (Normes issues de BASEMEQ²), la consommation de carburant, éventuellement la location du matériel (ETA, Cuma...).

2 BASEMEQ : Base de données des caractéristiques du matériel agricole développée par Arvalis - Institut du végétal. Propose le prix du matériel, des débits de chantiers et des consommations de carburant des matériels en fonction du type de sol, de la géométrie de la parcelle et du rendement.

- Charges de main-d'œuvre : (salaires et charges sociales). Parmi les 2 UTH dédiées virtuellement à chaque micro-ferme, une UTH est une main-d'œuvre familiale, l'autre étant considérée en main-d'œuvre salariée avec une rémunération de chauffeur de tracteur soit 27 000 € bruts annuels (d'après ASAVPA). Les charges de MSA ne sont pas incluses dans cet indicateur, par convention.
- Consommation de carburant : correspond à la quantité de carburant utilisé par les matériels pendant les interventions sur les parcelles. Ne sont pas comptabilisées les consommations annexes (manutention par exemple).
- Débits de chantier sont déterminés en fonction de la vitesse d'avancement pour chaque matériel ou train de matériel, et la largeur de travail (Normes issues de BASEMEQ).
- Consommation d'énergie primaire des systèmes (MJ/ha). Elle correspond à la somme des consommations des énergies brutes non renouvelables (pétrole, charbon, uranium, etc.) nécessaires à l'extraction, la production et la distribution des produits utilisés. Sont prises en compte les consommations d'énergie liées aux intrants (engrais, phytos, semences, carburant, etc.) et aux matériels utilisés (coûts énergétiques de fabrication des matériels agricoles). Les étapes post-récolte (gestion du grain, etc.) ne sont pas incluses dans le calcul de SYSTERRE®.
- Emissions de gaz à effet de serre (kg éq CO₂/ha): estimation des quantités de gaz à effet de serre émises de manière indirecte (fabrication et mise à disposition des intrants et équipements), et directe (combustion des carburants et dénitrification). Les variations de stock de carbone dans le sol ne sont pas prises en compte.
- Indice de fréquence de traitement herbicides : il s'agit ici d'IFT Produit. Il correspond au nombre de doses homologuées appliquées par unité de surface. Les IFT sont le ratio des doses employées sur les doses homologuées. Ils sont calculés par produit appliqué, puis agrégés à l'échelle du ou des systèmes de culture de l'exploitation.
- note de satisfaction désherbage (NSD) : il s'agit d'une note globale de satisfaction (de 0 à 10) donnée à chaque parcelle en fin de campagne qui traduit l'état final de propreté des parcelles (Rodriguez *et al.*, 2011). Cet indicateur est issu d'observations terrain. La note de 10 correspond à une parcelle exempte d'adventices. En deçà de 7, la gestion de la flore sur la parcelle est jugée insuffisante. En deçà de 5, l'enherbement peut entraîner des pénalités sur le rendement, et/ou un fort enrichissement du stock semencier. On estime que cette note est précise à +/- 0.5 point.

La nature multifactorielle de l'essai micro-fermes de Boigneville n'autorise pas l'établissement d'un lien direct entre les stratégies de travail du sol et la productivité technique des systèmes de culture. Cette dernière dépend ici d'autres leviers tels que les effets des précédents, la fréquence de retour des cultures, les règles de pilotage de l'ensemble de l'itinéraire technique réalisé. Pour cette raison, cet article n'aborde pas les indicateurs qui dépendent directement des rendements, tels que les marges économiques ou les bilans énergétiques.

La question de l'impact du travail du sol sur le rendement des cultures est l'objet du chapitre 2.

Impact du type de travail du sol sur les performances techniques de l'exploitation et l'organisation des chantiers

En système Raisonné, le passage de charrue se réalise à 8 km/h en vitesse de croisière, permettant de retourner 1.3 ha/h. En Mach II TSL, et en Raisonné lorsqu'il n'y a pas de labour, une préparation de semis au vibroculteur se réalise à 12 km/h pour un débit de chantier de 6 ha/h. Soit un temps multiplié par 4.5 entre les deux types de préparation. Le temps est nul par définition en Mach II SDCV.

Concernant le semoir, on compte 6 ha/h pour le semoir combiné avec la herse rotative et pour le semoir sur déchaumeur, contre 2,5 ha/h en semis direct. Dans la micro-ferme Mach II SDCV, l'investissement virtuel dans deux semoirs de 8 m permet de remonter le débit de chantier à près de 5 ha/h, sans dépasser l'enveloppe de l'IVAN de 700 000 €.

Les débits de ces matériels impactent significativement les temps de chantier à l'interculture et au semis (tableau 10.2), avec des conséquences sur le temps de traction annuel nécessaire pour mener les systèmes de culture dans les micro-fermes.

Tableau 10.1 : Caractéristiques techniques des principaux outils de travail du sol mobilisés dans les micro-fermes de Boigneville (91). période 2006-2013.

Micro-Fermes	Outil	Tracteur associé (CV)	Largeur (m)	Vitesse avancement (km/h)	Débit chantier (ha/h)
«Raisonné»	Charrue 6 corps*	220	2.3	8	1.3
«Raisonné»	Semoir Herse rotative	160	4	8	1.5 à 2
«Raisonné»	Vibroculteur	130 à 160	6	12	6
«Raisonné»	Déchaumeur à disques	220	6	8	3.3
« Mach II TSL »	Vibroculteur	160	6	12 à 14	6 à 7
« Mach II TSL »	Semoir sur déchaumeur	160	6	12	6
« Mach II SDCV »	Semoir Semis Direct à disques	150	8	4	2.5

Source Basemeq - ARVALIS - Institut du végétal. * uniquement sur l'ilot en sols moyennement profonds.

Tableau 10.2 : Caractéristiques techniques liées à la stratégie de travail du sol dans les micro-fermes. Données en sols moyennement profonds. Période 2006- 2013

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II TSL 2006-2010	Mach II SDC» 2011-2013
Nombre d'opérations par campagne de travail du sol en interculture - hors semis	1.7	3.9	0
Temps de traction total – moyenne système (h/ha)	3.25	2.0	1.5
Temps de traction total blé tendre (h/ha)	3.0	1.80	1.70
<i>dont semis</i>	<i>1.5</i>	<i>0.85</i>	<i>0.70</i>

Pour la culture de blé tendre, par exemple, qui nécessite au total 3 h/ha de traction au cours de la campagne en Raisonné, la moitié de cette durée est consacrée au travail du sol et au semis. En Mach II TSL, le temps dédié au semis et au travail du sol descend à 0,85 h/ha. Le gain est enregistré au semis et permet de réduire à 1,80 h/ha le temps de traction total sur les parcelles. Si le semis direct permet

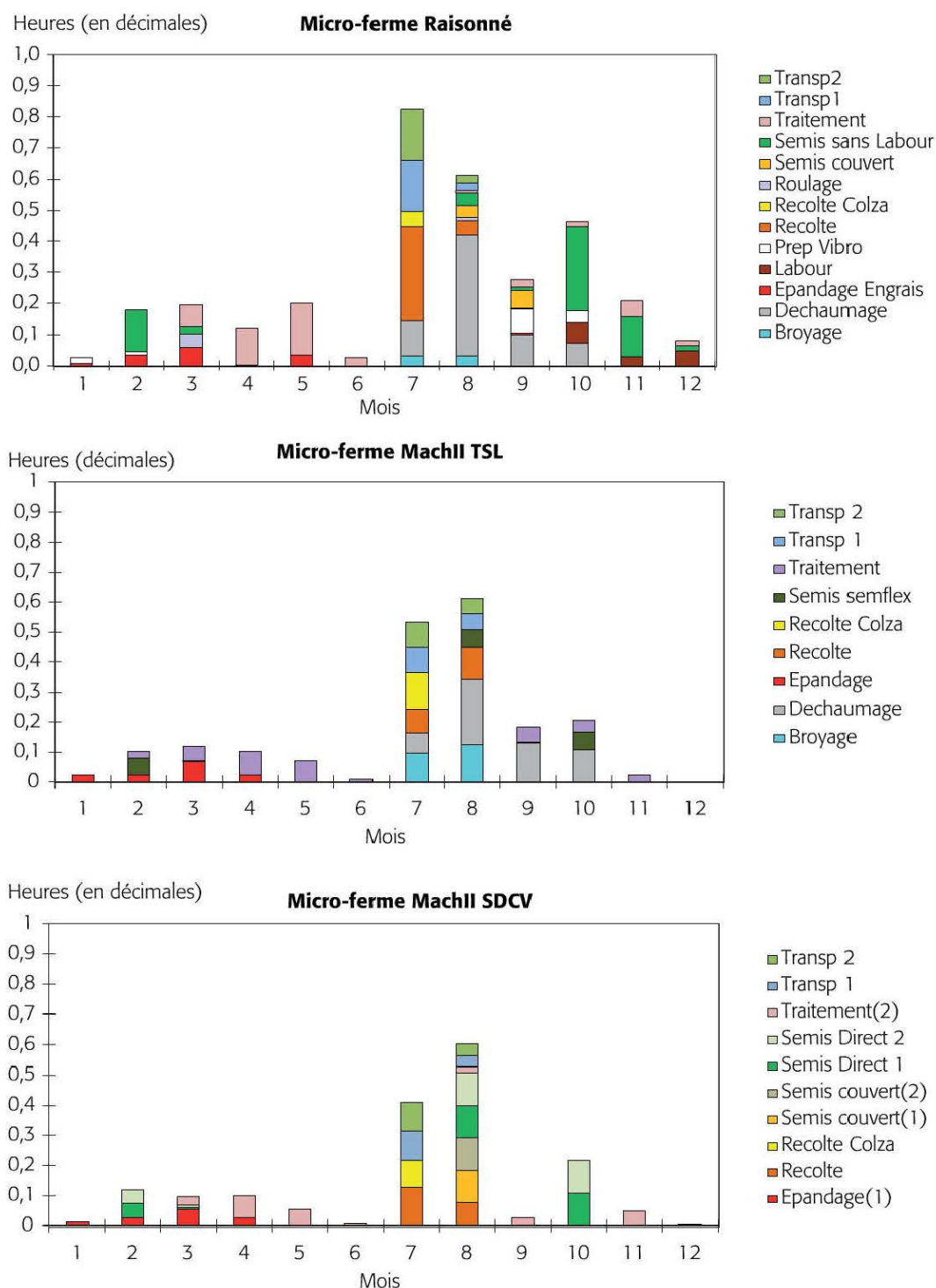


Figure 10.1 : Répartition mensuelle des heures de traction pour les micro-fermes Raisonné, Mach II TSL et Mach II SDCV. Données moyennes par opération culturale, pour l'ensemble de la micro-ferme (tous types de sol confondus), en heure/ha.

de réduire encore le temps de traction moyen à 1,70 h/ha, avec le matériel choisi 0,7 h reste consacrée à l'opération de semis seule.

Les tendances se confirment à l'échelle des systèmes de culture. On enregistre en moyenne 2 h de traction/ha en Mach II TSL contre 3,3 h en Raisonné. Cela, malgré une multiplication des opérations de déchaumage en interculture (3.9 passages/ha en Mach II TSL entre 2006 et 2010 ; 2.8 passages dans Raisonné). Le passage en semis direct réduit encore ce temps à 1,5 h/ha.

Dans les conditions pédoclimatiques de Boigneville, le recours aux techniques sans labour permet un gain de près de 40 % du temps de traction à l'hectare sur la campagne, qui s'observe à la fois pour la préparation du sol et le semis (figure 10.1). Le recours au semis direct, lui, fait baisser le temps de traction total à l'hectare de 55 % et libère surtout du temps à l'interculture.

Impact du type de travail du sol sur les performances économiques de l'exploitation

Pour les exploitations, un temps de traction réduit permet un moindre recours à la main-d'œuvre et en charge de mécanisation à l'hectare. En 2008, Crochet et Nicoletti montrent que les économies restent conditionnées à une bonne adaptation de la puissance des tracteurs aux outils de travail du sol et au dimensionnement du semoir aux jours disponibles de l'exploitation pour réaliser les semis auquel il faut ajouter des baisses de consommation en carburant univoques (tableau 10.3). Le système en labour simplifié a consommé 78 l/ha de carburant entre 2006 et 2013. Près de 54 % de ce volume a été consacré au travail du sol et semis, soit 43 L/ha.

Le recours aux techniques sans labour réduit en grande partie la dépendance au carburant : ce poste représente 19 L/ha, soit deux fois moins que dans le Raisonné.

Dans Mach II SDCV, même si l'opération de semis réalisée avec deux semoirs a une consommation proche d'un semis avec herse rotative, l'absence de tout autre intervention réduit d'un facteur 4 la consommation en carburant pour l'ensemble des opérations de travail du sol par rapport à la référence.

Cependant, ces économies, si importantes soient-elles pour le poste carburant, ont un poids réduit dans les coûts de production et sont à mettre en regard des gains observés sur l'amortissement du matériel et de la main-d'œuvre.

Dans l'essai de Boigneville, les tracteurs sont adaptés aux besoins des micro-fermes. Raisonné est équipée de 3 tracteurs pour une puissance totale de 500 CV, dont un tracteur de tête de 220 CV nécessaire à la traction de la charrue 6 corps

Tableau 10.3 : Consommation en carburant dans les micro-fermes, sur les parcelles en sols moyennement profonds (2006-2013), en volume et en charge à l'hectare (prix retenu 0. 70€/l)

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II TSL 2006-2010	Mach II SDCV 2011-2013
Total toutes opérations(l/ha et €/ha)	78 / 55	46 / 32	35 / 25
Travail du sol (l/ha et €/ha)	32 / 22	16 / 11	0 / 0
Semis (l/ha et €/ha)	11 / 8	3 / 2	9 / 6

et du déchaumeur à disque. Mach II n'est équipé que de 2 tracteurs de 160 CV, soit un total de 320 CV dans la période sans labour [TSL] (2006-2010), et de deux tracteurs de 150 CV dans la période semis direct sur couvert végétal [SDCV] (2011-2013) (300 CV).

L'évaluation de l'enjeu du travail du sol sur les charges de main-d'œuvre et de mécanisation nécessite cependant de déterminer par extrapolation les surfaces maximales cultivables dans les conditions envisagées pour chaque micro-ferme. En effet, la comparaison des systèmes n'est pertinente que si on s'assure que le temps de traction est saturé dans toutes les micro-fermes (Nicoletti *et al.*, 2005). A l'échelle annuelle (soit 1 500 h/an dans les conditions de l'essai), ou sur une période donnée selon la capacité à déployer des surfaces pour un chantier, en respectant les temps de traction maximum (cf. durées citées précédemment).

L'étude d'extrapolation mobilise deux outils :

- « JDispo » (pour « Jours disponibles ») qui se basent sur les conditions climatiques et la nature des sols pour en déterminer la portance nécessaire à chaque intervention (Nicoletti, 2008) ;
- « Simeq », un simulateur qui reproduit le fonctionnement d'une exploitation sur le plan matériel et organisationnel (Rieu, 1991).

Elle a été réalisée en suivant la méthode développée par Arvalis dans les années 1990 (Nicoletti, 2005) qui consiste à déterminer la faisabilité des itinéraires techniques établis *a priori* pour un système de culture, en testant des surfaces croissantes. Chaque partie de l'itinéraire technique, pour chaque culture de la rotation, est testée en tenant compte des débits de chantiers, des calendriers prévisionnels des interventions, et des temps de traction maximum par jour.

Les simulations sont répétées selon les scénarios climatiques observés au cours des 20 dernières campagnes (période 1991-2010 au moment de l'étude).

Les dates optimales sont ajustées en fonction des outils mobilisés. Pour l'opération de semis de blé d'hiver par exemple, la période de semis optimale testée court du 22/10 au 30/10 en Raisonné. En Mach II TSL, les dates vont du 11/10 au 30/10 ; en Mach II SDCV, les dates sont encore anticipées, du 01/10 au 25/10, compte tenu des risques plus élevés de conditions mal adaptées au semis.

Les surfaces maximales déterminées sont celles qui permettent de réaliser chaque opération dans les conditions optimales de date et d'état de portance du sol. La règle est la même pour tous les systèmes : on accepte 2 années sur 10 qu'une part des interventions soit réalisée hors période optimale : soit 30 % maximum des surfaces en période « optimale étendue » pour les semis.

L'étude a permis de déterminer que la micro-ferme Mach II TSL est réalisable sur 760 ha, et Mach II SDCV sur 800 ha (tableau 10.3), contre 430 ha pour Raisonné. Il s'agit ici de la surface de la micro-ferme, qui cumule les surfaces pour les deux îlots – sols moyennement profonds et sols superficiels (dont surfaces en jachères pour répondre aux obligations réglementaires). Ce sont les temps de traction hebdomadaires qui ont limité le déploiement des surfaces, pour toutes les micro-fermes, et non le nombre de jours disponibles au semis.

Tableau 10.4 : Surfaces déployées estimées avec les logiciels SIMEQ et JDISPO, et charges de mécanisation et de main-d'œuvre pour les micro-fermes. Hypothèse main-d'œuvre : 2 UTH par système (1 UTH familiale non rémunérée et 1 UTH employée).

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II TSL 2006-2010	Mach II SDCV 2011-2013
Surfaces déployées potentielles (ha) source étude SIMEQ/JDISPO	430	760	800
Temps de traction annuel (h)	1400	1520	1215
Charges de mécanisation (€/ha)	240	162	158
<i>dont carburant</i>	55	32	25
Charges main-d'œuvre (€/ha)	55	34	31
Total charges mécanisation + main-d'œuvre (€/ha) (hors MSA)	295	196	189

Cette étape d'extrapolation autorise des évaluations à l'échelle des systèmes de production et rend pertinentes les références telles que les charges de mécanisation et de main-d'œuvre, les calculs de rentabilité et de compétitivité et les bilans Énergie/GES.

Les charges de mécanisation calculées en moyenne pour Raisonné sont estimées à 240 €/ha, auxquelles s'ajoutent 55 €/ha de main-d'œuvre. Avec un volume de temps de traction annuel assez proches de la référence, Mach II TSL et Mach II SDCV ont des charges de mécanisation de 162 et 158 €/ha, et des charges de main-d'œuvre de 34 et 31 €/ha. Soit une réduction de près de 100 €/ha.

La démarche qui consiste à figer l'Investissement en Valeur A Neuf (IVAN) et à saturer le temps de travail des 2 UTH pour déterminer les surfaces maximales extrapolables est éloignée de ce que vivent les exploitations agricoles. Une variante de l'étude a donc consisté à évaluer les impacts d'un changement de pratique de travail du sol pour une exploitation à taille constante de 430 ha.

Dans un premier scénario, le parc matériel de « Mach II TSL » a été réadapté à cette nouvelle surface, réduisant l'IVAN à 540 000 €. La main-d'œuvre, maintenue à 2 UTH cumule 1000 h de traction/an. Cette micro-ferme génère alors des charges de mécanisation et de main-d'œuvre de 243 €/ha. Soit un écart avec la référence « Raisonné » de 52 €/ha.

Dans un second scénario, le parc de Mach II TSL est maintenu. La main-d'œuvre est adaptée au nombre d'heures de traction nécessaires sur cette surfaces plus petite, (soit 1.2 UTH, pour 700 h annuelles). Dans ce scénario, l'écart à la référence est de 108 €, avec des charges de mécanisation et de main-d'œuvre estimées à 187 €/ha.

A surface équivalente, et sous réserve d'adapter le matériel et la main-d'œuvre au plus près des besoins, la stratégie des techniques sans labour génère des charges de mécanisation et de main-d'œuvre inférieures à la référence labourée.

Impact du travail du sol sur les performances environnementales de l'exploitation

La consommation en énergie primaire totale d'un système est la somme des consommations pour les intrants, matériels et carburants utilisés. Pour les intrants, le calcul est fonction de quantités appliquées. Les consommations en énergie pour le carburant sont une traduction des consommations estimées pour chaque opération à partir de BASEMEQ. Les consommations en énergie du poste matériel dépendent de l'usage qui est fait des matériels et sont calculées avec la même méthode d'amortissement que pour les calculs économiques.

Les trois micro-fermes ont une dépendance à l'énergie primaire équivalente. Avec une consommation annuelle moyenne à peine supérieure à 13 000 MJ/ha, elles se situent dans la gamme des exploitations de grande cultures céréalières en sec (Cascailh A. *et al.*, 2012 ; Bouchu *et al.*, 2010).

Selon les estimations de SYSTERRE, les besoins en énergie primaire pour le poste matériel pèsent 345 MJ/ha pour la référence Raisonné, soit 2.6 % des dépenses totales. Ce poids est réduit pour Mach II TSL et SDCV avec respectivement 1.7 et 1.8 % du total, mais l'impact pour le bilan des micro-fermes reste limité pour ce poste considéré seul.

En effet, l'enjeu du type de matériel de travail du sol est essentiellement lié à la consommation en carburant qui en découle. Raisonné dépense l'équivalent de 2 116 MJ/ha de carburant pour les opérations de travail du sol, quand Mach II TSL dépense 917 MJ/ha et Mach SDCV 428 MJ/ha.

L'orientation des micro-fermes vers du travail simplifié, parce qu'elle génère des besoins en carburant à l'hectare inférieurs pour les opérations de travail du sol et de semis, implique une moindre dépendance des systèmes de culture à l'énergie primaire.

Cet impact reste néanmoins à relativiser au regard du poids que représente l'usage des intrants dans les dépenses en énergie primaire : entre 70 et 80 % dans notre exemple. A titre de comparaison, l'enjeu de la stratégie de travail du sol et de semis, soit 1700 MJ entre Raisonné et Mach II SDCV a le même poids qu'une réduction

Tableau 10.5 : Estimation des consommations en énergie primaire dans les systèmes de culture en sols moyennement profonds des micro-fermes (moyenne 2006-2013).

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II «TSL» 2006-2010	Mach II «SDCV» 2011-2013
Carburant Total (MJ/ha)	3 903	2 312	1 667
<i>dont Carburant semis</i>	548	150	428
<i>dont Carburant travail du sol</i>	1 568	767	0
Autres postes	1 787	1 395	1 239
Intrants (MJ/ha)	8 987	10 466	11 623
Matériel (MJ/ha)	345	227	250
Total (MJ/ha)	13 234	13 004	13 540

Total = Matériel + Intrants + Carburants. Carburant = toutes opérations.

Tableau 10.6 : Estimation des émissions en gaz à effet de serre dans les systèmes de culture en sols moyennement profonds des micro-fermes (moyenne 2006-2013). Hors variation des stocks de carbone dans le sol et effet des techniques de travail du sol sur les émissions en GES.

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II TSL 2006-2010	Mach II SDCV 2011-2013
Carburant Total (kgéqCO ₂ /ha)	262	155	112
<i>Dont Carburant semis</i>	37	10	29
<i>dont Carburant travail du sol</i>	105	52	0
Autres postes	120	94	83
Intrants (kgéqCO ₂ /ha)	1 891	2 002	2 123
Matériel (kgéqCO ₂ /ha)	2	9	10
Total (kgéqCO ₂ /ha)	2 166	2 166	2 244

tion d'usage de 30 kg N/ha d'azote minéral, que les outils de pilotage permettent d'économiser.

Les émissions en GES estimées pour les micro-fermes sont proches les unes des autres, avec 2200 kgéqCO₂/ha en moyenne. Le poste des intrants pèse plus encore que pour les bilans d'énergie : 87 à 95 % du total.

Le poids du poste matériel seul est minime (de 4 à 6 % selon la micro-ferme). Le choix de matériel et les dépenses en carburant associées impliquent des émissions de 142 kgéqCO₂/ha pour Raisonné, 62 kgéqCO₂/ha pour Mach II TSL et 29 kgéqCO₂/ha pour Mach II SDCV.

Compte tenu des enjeux observés sur l'exemple des micro-fermes, on peut considérer que l'impact des orientations du travail du sol est mineur dans le bilan GES des systèmes de culture.

Cette conclusion reste néanmoins partielle, notamment en absence de prise en compte des effets biologiques du sol sur les GES, dont entre autres les variations du stock de carbone dans le sol. Pour plus d'information sur l'impact l'état du sol sur le bilan GES, le lecteur est invité à se référer au chapitre 4.

Effet sur le potentiel agronomique des parcelles

Le dispositif des micro-fermes ne permet pas à lui seul de renseigner l'ensemble des points que l'agronome voudrait considérer pour une évaluation pluricritères exhaustive des stratégies de travail du sol. Parmi ceux-là, entre autres, le rôle du travail du sol sur la structure du sol n'a pas pu être redémontré à partir des mesures réalisées dans les parcelles des micro-fermes, mais reste à l'étude. Ce point est cependant suffisamment éclairé dans le chapitre 3.

Les critères de maîtrise des adventices sont aussi tout à fait déterminants pour juger des effets du travail du sol, comme expliqué dans le chapitre 6. L'exemple des micro-fermes vient compléter les références sur ce sujet.

La population de flore adventice est le résultat d'un ensemble de facteurs et conditions, en interactions les uns avec les autres. Les analyses réalisées récemment

sur l'ensemble des parcelles de l'essai ont révélé que l'année culturale constitue la première variable explicative de l'état d'enherbement des parcelles en fin de campagne, traduite par la note de satisfaction du désherbage (Pottier *et al.*, 2013). Cette variable année culturale traduite à la fois les conditions annuelles pour le développement des adventices, et les conditions pour l'efficacité des applications herbicides ou mécaniques réalisées. Selon cette même étude, l'effet système constitue la deuxième variable explicative. Il traduit à lui seul l'importance de coordonner à la fois la stratégie d'assemblage des cultures, les techniques mécaniques de travail du sol et les méthodes de lutte chimique pour réussir la maîtrise de la flore, c'est-à-dire, pour maintenir des parcelles propres.

Les notes de satisfaction mesurées annuellement permettent de juger d'une gestion satisfaisante de l'enherbement, quasi équivalente (figure 10.2), dans Raisoné et Mach II TSL et Mach II SDCV. Les moyens sont cependant divers, pour compenser, semble-t-il l'absence de retournement profond des parcelles.

En effet, MACH II est plus consommateur en herbicides que Raisoné, que ce soit en techniques sans labour ou en semis direct avec couvert végétal. Dans ces systèmes, le levier désherbage mécanique en interculture n'est pas suffisant, spécialement vis-à-vis des graminées (ray-grass) (Gautellier-Vizioz *et al.*, 2013). Ce résultat est en accord avec l'enquête pratiques culturales de 2006, selon laquelle on observe une hausse des indices de fréquence de traitement entre labour et non labour de 0.35 point en moyenne sur les céréales à paille, et de 0.7 point pour le colza (Agreste, 2008).

A ce stade de l'essai, les micro-fermes montrent qu'une réduction de travail du sol se traduit par des besoins en herbicides supérieurs à ceux requis dans le système Raisoné avec labour, essentiellement en interculture ; la pratique a essentiellement consisté à garantir un sol propre avant les semis, mais aussi à détruire dès la récolte les adventices très développées. La hausse de coûts observée est de 44 €/ha en moyenne.

Le passage en semis direct en combinaison avec des implantations plus fréquentes de couverts de service sont mis en avant dans la littérature comme une voie pour réduire la pression adventices. Après une première rotation, il est trop tôt pour juger de cet effet sur la micro-ferme Mach II SDCV.

Tableau 10.7 : Importance de différents leviers mobilisés dans la gestion des adventices dans les systèmes de culture en sols moyennement profonds des micro-fermes Raisoné, Mach II TSL et Mach II SDCV (2006-2013)

	RAISONNE Labour 2006-2013	Mach II TSL 2006-2010	Mach II SDCV 2011-2013
Nombre d'opérations de travail du sol par campagne hors semis	1.7	3.9	0
IFT Herbicide	1.8	3.4	3.6
<i>dont IFT herbicide en interculture</i>	<i>0.4</i>	<i>1.2</i>	<i>1.9</i>
Note satisfaction désherbage	8.4	8.3	8.2

* Référence Ile de France: 1.7

Note de Satisfaction Désherbage

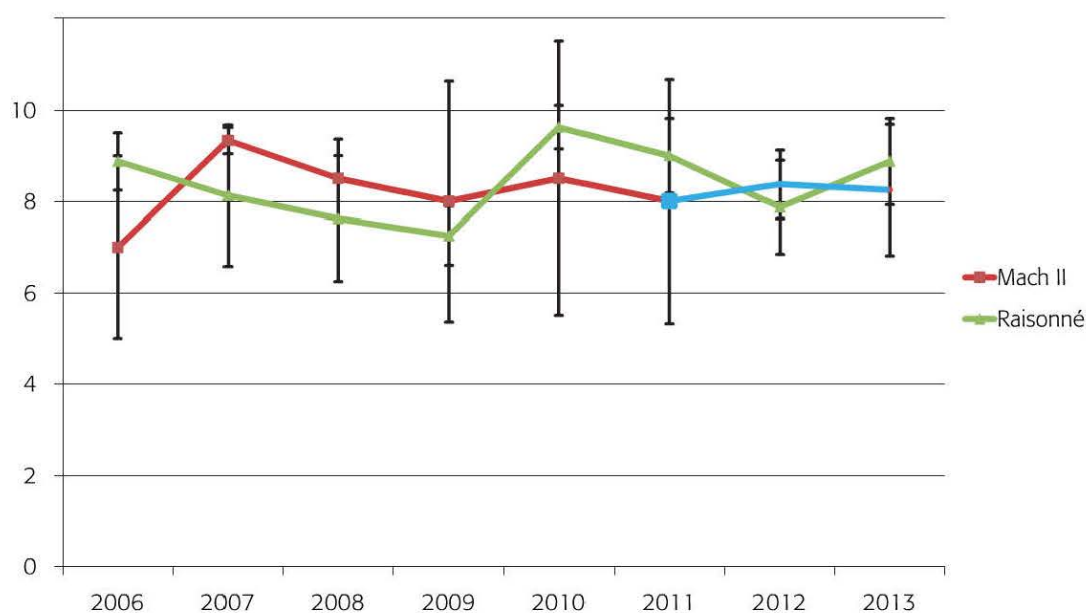


Figure 10.2 : Notes annuelles de satisfaction désherbage (de 0 à 10). Moyennes par îlot en sols moyennement profonds. (2006-2013)

Conclusion

Les techniques simplifiées de travail du sol sont une source réelle de gain de temps pour une exploitation, allégeant les pointes de travaux de la fin d'été et de l'automne. Elles permettent également de réduire significativement les consommations en carburant, jusqu'à 50 % selon l'orientation choisie. Dans ces conditions, des économies de charges de mécanisation et de main-d'œuvre sont possibles lorsqu'on passe au non-labour, sous réserve d'ajuster la puissance de traction aux moindres besoins des outils de semis et de conserver la cohérence entre main d'œuvre, surface travaillée et équipement.

D'un point de vue environnemental, les techniques simplifiées de travail du sol sont des sources d'économie d'énergie primaire, et sont favorables à une réduction des émissions de GES, conséquence quasi directe du moindre usage des carburants. Le poids du facteur travail du sol reste néanmoins à relativiser au regard de ce que pèse l'usage des intrants dans le bilan global Énergie et GES. La modification de la stratégie de travail du sol ne peut suffire à elle seule à améliorer significativement l'empreinte énergétique d'une exploitation de grande culture. Quant au rôle sur l'atténuation du réchauffement climatique, l'étude présentée ici n'est que partielle et n'intègre pas tous les processus liés au fonctionnement du sol.

Si dans une première partie de l'évaluation pluri-critères présentée, la part belle est donnée aux techniques simplifiées de travail du sol, d'autres aspects, moins favorables, ne doivent pas être occultés. Parmi eux, celui de la dépendance aux herbicides.

Les enjeux à moyen terme sont importants pour une exploitation céréalière dans un contexte de développement de flores résistantes, et de pression réglementaire et environnementale. Au-delà d'une charge en herbicides augmentée de 50 %, le

risque d'impasses possibles à moyen terme doit être bien considéré avant de faire le choix du non-labour sur l'exploitation. La maîtrise de la flore nécessite d'être innovant si on veut limiter l'usage des herbicides ; et de ne pas perdre de vue que la charrue peut encore rendre des services en cas de coup dur.

Bien que partielle, l'évaluation pluri-critères réalisée sur les micro-fermes de Boigneville permet de constater qu'il n'y a pas de solution de travail du sol idéale, permettant aux exploitations de répondre à tous les objectifs de durabilité.

Le choix d'équipement reste le résultat d'un compromis qui doit intégrer de multiples contraintes propre à l'exploitation. Une invitation pour le producteur à revoir le système de culture dans sa globalité lorsqu'il engage une réflexion sur la stratégie de travail du sol de son exploitation.

Remerciements pour leur contribution précieuse à : Jean ROGER-ESTRADE, Lionel JOUY, Jacky CREUZET, Jean-Luc WYMEERSCH, Jean-Marc GUERIN

Références bibliographiques

- Agreste Primeur, 2008. « Dans le sillon du non-labour ». *Numéro 207. Février 2008*
- ASAVPA. Salaire brut annuel ouvrier qualifié III 1, <http://aisne.asavpa.asso.fr/index.php?page=g7>.
- Berrodier M., Jouy L. 2013. Systerre® : Méthode de calcul des indicateurs. *Tutoriel*.
- Bochu J-L., Bordet A-C., Metayer N., Trevisiol A., 2010. Références Planete 2010, Fiche 1- Généralités : présentation des exploitations et résultats globaux. *Toulouse : SOLAGRO, 2010, 29 p.*
- Cascaill A, Belveze J., Bochu J.L., Bordet C., 2012. Consommations d'énergie dans les exploitations agricoles de Midi-Pyrénées et création d'un réseau de conseil aux agriculteurs. *Innovations Agronomiques 25. P15-25*
- Crochet F., Nicoletti J.P., 2008. Simplification du travail du sol : Un intérêt économique variable d'une exploitation à une autre. *Perspectives agricoles. N344. Avril 2008*
- Gautellier-Vizioz L., Jouy L., Vacher C., Pottier M., 2013. Maîtrise des adventices : miser sur la cohérence des pratiques. Dossier « Micro-Fermes de Boigneville » ; *Perspectives Agricoles (novembre 2013). N° 405.*
- L'Herbier C., 2014. Fermage en hausse chez nos concurrents. *Perspectives Agricoles (Janvier 2014). N° 407.*
- Labreuche J. 2010. Techniques sans Labour : Réduire les charges dans baisser les rendements. *Perspectives agricoles (Avril 2010). N° 366*
- Lechenet M., Deytieux V., Antichi D., Barberi P., Bertrand M., Charles R, Colnenne-David C., Dachbrodt-Saaydeh S., Farcy P., Fernandez-Quintallina C., Grandeau G., Hawes C., Jouy L., Justes E., Kierze R., Kudsk P., Mazzocini M., Melander B., Moonen A-C., Newton A-C., Nolot J-M., Panozzo S., Retaureau P., Sattin M., Schwarz J., Toqué T., Vasileiadis V., Munier-Jolain N. Sous presse. Diversity of methodologies in cropping system experiments: analysis of a European network based on Integrated Pest Management in arable farming. *Endure*
- Longchamp J-Y., Pages B., 2012. Charges de mécanisation et structure d'exploitation. *Document de travail. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/doctravail70712-2.pdf>. CCAN. N°7*

Ministère de l'Agriculture, 1984. Indicateur de performances et des coûts d'utilisation de l'équipement agricole. *GEMAG (Centre d'Etude du Matériel Agricole de Gembloux). Belgique.*

Nicoletti J.P., Leveau V, L'Herbier C., 2005. Comment étudier l'impact de la réforme de la PAC sur les marges brutes. *Grande Cultures Infos, Hors-Série, Juin 2005.*

Nicoletti J.P., 2008. Calcul des « jours disponibles ». Choisir ses outils en fonction du risque climatique. *Perspectives agricoles. N°347. Juillet-Août 2008*

Pottier M., Toqué C., Gautellier-Vizioz, Vacher C., Jouy L., Duyme F., 2013. Maîtrise de la flore adventice dans l'essai système « Fermes de Boigneville » : méthodologie et premiers résultats de l'analyse de 20 ans de références sur quatre systèmes d'exploitation. *22ème Conférence du Columa ; AFPP. Book of Abstracts.*

Rieu C., 1991. SIMEQ : un outil d'aide à la réflexion. *Perspectives agricoles. N°163. Novembre 1991*

Rodriguez A., Vacher C., Quillot E., Guillemain J.-P., Munier-Jolain N., 2011. Guide méthodologique de suivi de la flore Adventice. *RMT FLORAD*

Toqué C., Retaureau P., 2013. Cinq Micro-fermes pour mieux préparer le futur ; Micro-fermes : Cinq systèmes à l'épreuve du temps. *Perspectives Agricoles (Novembre 2013) ; N°405.*

Conclusion

Synthèse et perspectives :

« faut-il travailler le sol ? »

J-P. BORDES, I. COUSIN

Les pratiques de travail du sol ont rapidement évolué depuis le début des années 2000. Le mouvement de simplification des techniques aratoires s'amplifie en même temps que leur diversité de mise en œuvre s'accroît. Le seul point commun qui caractérise les techniques sans labour est l'absence de retournement mais elles se distinguent entre elles par la profondeur de travail, le type d'outil, la zone travaillée et l'ancienneté de leur mise en œuvre.

Le regard porté sur les techniques de travail du sol s'appuyait autrefois sur trois types de situations : le labour, le travail superficiel et le semis direct. Aujourd'hui la multitude de combinaisons possibles entre les différentes techniques de travail du sol fait qu'il n'est plus possible de raisonner sur cette base. Le questionnement sur ces techniques a lui aussi évolué. Il était important, au début des techniques sans labour, de les comparer entre elles pour en rendre lisibles les avantages et les inconvénients, répondant ainsi aux agriculteurs confrontés à un choix technique sur leurs exploitations. Aujourd'hui le questionnement ne repose plus sur la seule comparaison de plusieurs techniques entre elles mais plutôt sur les bonnes modalités de mise en œuvre, puisque l'on se rend compte que le mode d'emploi de ces techniques semble aussi important que le choix de l'une ou de l'autre. L'expérience de plusieurs agriculteurs qui ont exploré de nouvelles modalités de travail du sol et témoignent dans cet ouvrage montre que les choix qu'ils ont retenus se sont construits au fil du temps en fonction des réussites et des difficultés rencontrées mais aussi des objectifs qu'ils poursuivaient. Le travail du sol n'est plus un choix de départ qui fige certains pans de l'itinéraire technique mais plutôt le résultat, la conséquence des services attendus de l'agro-écosystème géré notamment au travers du travail du sol. La question prépondérante n'est plus « pour ou contre le labour ? » mais « comment faire pour optimiser la technique choisie, avec ou sans labour » et « pour quel objectif ? ».

Néanmoins, et malgré ces difficultés apparentes, quelques acquis présentés dans cet ouvrage sont cependant remarquables. Il nous semble opportun de les recenser selon une grille de lecture fournie par le concept de services écosystémiques.

La controverse sur l'effet de la réduction du travail du sol sur le rendement est ardente, aussi bien dans la littérature scientifique que lors des tours de plaine. Il semble cependant, en croisant nombre de résultats dans des contextes agro-pédo-climatiques variés, que le potentiel de rendement à long terme ne soit pas affecté par une réduction du travail du sol, même si, à court terme, des diminutions sensibles ont pu être observées. Le rendement des cultures ne serait donc pas affecté en moyenne par les pratiques de travail réduit, mais des variabilités interannuelles de rendement sont à prévoir.

En revanche, l'effet d'une modification des pratiques de travail du sol sur la composante biologique des agro-écosystèmes est beaucoup plus controversé. Si la suppression du labour, à long terme, est favorable à l'augmentation de la biodiversité (bien que de façon contrastée sur les bactéries ou sur les champignons) et que se mettent en place de complexes régulations biologiques sous l'effet d'un travail plus réduit que le labour, la compréhension des conséquences du non-retournement sur la gestion des adventices et la régulation des maladies reste incomplète. Elle est cependant nécessaire pour que puissent être proposées des alternatives durables à l'utilisation de produits phytosanitaires, souvent encore utilisés de manière plus abondante en contexte de travail simplifié (herbicides notamment). La présence d'un couvert végétal ou de résidus de cultures en surface, commune en travail simplifié, semblerait avoir un effet bénéfique sur l'érosion du sol, bien que ses conséquences sur la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau soient plus sujets à discussion. À court terme, la suppression du labour entraîne une augmentation des émissions de N_2O , mais le bilan net d'émissions de gaz à effet de serre n'est pas significativement modifié après plusieurs années de conversion au travail réduit. De même, à long terme, et contrairement à l'idée répandue que le non-travail est systématiquement favorable à la séquestration du carbone, les sols cultivés selon des pratiques de travail réduit stockent une quantité de carbone égale ou légèrement supérieure aux sols travaillés selon des pratiques conventionnelles.

La structure du sol et sa dynamique sont affectées de façon contrastée par la mise en place de pratiques de travail réduit : les techniques sans labour ont un effet bénéfique sur l'agrégation du sol, mais elles ne contribuent pas à favoriser la résilience au tassement à court terme. Après quelques années, la fissuration sous l'impact du climat et la perforation par la mésofaune et les racines, alliées au processus d'agrégation que nous venons de mentionner, favorisent la destruction de zones tassées et contribuent à recréer une structure favorable à l'infiltration de l'eau dans le sol. Par ailleurs, les techniques sans labour n'ont pas plus d'effet sur la minéralisation nette de l'azote que les techniques à base de labour. Les cycles biogéochimiques ne sont donc globalement pas affectés par la suppression du labour, mais peuvent présenter une variabilité interannuelle plus marquée. Cette variabilité, ici mentionnée pour les cycles biogéochimiques, est d'ailleurs généralisable à de nombreux travaux qui traitent de la différence des effets entre techniques de travail du sol : la variabilité interannuelle des résultats est bien souvent supérieure à la variabilité des résultats entre techniques de travail du sol.

La conception nouvelle du travail du sol que nous avons mentionnée plus haut « quel mode de travail du sol pour optimiser mon système de culture ? », inverse le raisonnement des agronomes, mais ouvre aussi de nouveaux champs de recherche.

La caractérisation de l'état physique du sol en est le premier. Il ne s'agit pas ici de mettre au point de nouveaux indicateurs de la fertilité physique mais d'apporter des éclairages nouveaux sur les éléments suivants : comment rendre compte de l'état physique du sol en interaction avec tous les facteurs qui ont une influence (climat, pratiques, activité biologique,...) sur sa structure ? Comment, également, caractériser et modéliser la dynamique pluriannuelle de l'évolution du sol afin de progresser dans notre compréhension des effets de la dynamique de la structure du sol sur la dynamique thermo-hydrique et biologique du fonctionnement du sol ? L'acquisition de nouvelles connaissances dans ces domaines permettrait, à terme, de proposer des outils de prévision de l'état physique en fonction des choix possibles qui s'offrent au producteur. De plus, il apparaît essentiel de pouvoir identifier puis de savoir combiner plusieurs leviers pour améliorer ou régénérer la structure du sol : faut-il préférer l'action racinaire d'un couvert végétal, celle des vers de terre, le passage d'un outil... ? Ceci nous conduit à implémenter une véritable boîte à outils pour gérer et préserver la fertilité physique des sols.

La problématique des couverts végétaux est à traiter conjointement à celle du travail du sol. Ils sont un des éléments de l'itinéraire technique pendant la période d'interculture et leur conduite doit être adaptée selon la stratégie de travail du sol afin d'optimiser les opérations culturales. Les fonctions écosystémiques des couverts sont au cœur du raisonnement lors de la conception de nouveaux systèmes de culture, orientée vers la réduction du travail du sol ou l'agroécologie. En effet, les couverts peuvent remplir certaines fonctions (structuration du sol, lutte contre certains ennemis des cultures, fixation symbiotique d'azote...) qui viendront en substitution à d'autres techniques ou intrants (travail du sol, produits phytosanitaires, engrais de synthèse...). Il est donc primordial de progresser dans la connaissance des fonctions assurées par les couverts végétaux, de leur impact sur toutes les composantes de l'écosystème (sol, eau, éléments minéraux, adventices, pathogènes, ravageurs...) pour mettre au point des systèmes de cultures innovants permettant d'optimiser les services attendus des agro-écosystèmes.

La plupart des effets de modes variés de travail du sol est évaluée à l'échelle de la parcelle et plus souvent à l'échelle d'échantillons de parcelles sans fourrière, ni recoupement, avec un précédent homogène, etc. On s'aperçoit cependant que le changement d'échelle spatiale (parcelle, bassin versant, territoire) ouvre de nouvelles questions concernant, par exemple, la biodiversité (développement des auxiliaires) les transferts de produits phytosanitaires, l'érosion, etc. La combinatoire au niveau du dispositif expérimental devient complexe à mettre en place et à étudier. Il ressort de cette complexité que la variabilité des pratiques chez les agriculteurs est un champ d'étude bien plus riche que celui qu'on peut créer en expérimentation planifiée. Les agronomes expérimentateurs, s'ils doivent maintenir leurs essais de longue durée, riches d'enseignements, se doivent également d'étudier chez les agriculteurs, *in situ*, de façon à tenir compte de la variabilité des situations agro-pédo-climatiques, et aussi à intégrer plus efficacement dans leurs modèles les contraintes liées à l'organisation du travail en exploitation. Si

le champ de l'innovation s'élargit, il pose cependant de nouvelles questions sur les méthodes expérimentales et les modèles d'extrapolation appropriés à cette nouvelle donne.

Plus que le choix de techniques, l'accompagnement des agriculteurs, plongés dans le changement, semble déterminant pour la réussite de leur projet technique. Il apparaît de façon plus évidente que les combinaisons de leviers agronomiques sont plus complexes mais aussi potentiellement plus efficaces qu'on ne le pensait. De ce fait, la recherche, au-delà des essais en conditions semi-contrôlées, doit s'intéresser aux nouvelles techniques de développement testées et discutées par certains agriculteurs eux-mêmes. Il s'agit ici que producteurs, conseillers et chercheurs allient leurs expertise, connaissance et savoir-faire pour accompagner l'ensemble de la profession agricole, non pas vers un modèle de travail du sol mais vers la combinaison la plus pertinente, correspondant le mieux à la situation et aux contraintes de chacun. Un nouveau référentiel sur les techniques de travail du sol est en train de se construire. Les travaux présentés et les expériences vécues indiquent qu'il ne faut pas essayer d'appliquer les connaissances issues d'un référentiel agronomique établi sur la base du labour à des situations qui reposent sur d'autres bases combinant du non-labour, parfois une couverture permanente du sol, ou d'autres particularités de l'itinéraire technique. Le développement et l'accompagnement de ces techniques devra nécessairement s'appuyer sur la formation mais aussi sur l'échange d'expériences entre agriculteurs, ainsi que sur la mise en place de nouveaux référentiels agronomiques.

Liste des auteurs

- Lionel ALLETTO (lionel.alletto@purpan.fr)
Université de Toulouse, INP Ecole d'ingénieurs de Purpan, UMR AGIR,
75 Voie du TOEC, BP 57611, 31076 TOULOUSE CEDEX 3
- Enrique BARRIUSO (barriuso@grignon.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS,
Route de la Ferme, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Carole BEDOS (bedos@grignon.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS,
Route de la Ferme, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Pierre BENOIT (benoit@grignon.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS,
Bâtiment EGER, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Antonio BISPO (antonio.bispo@ademe.fr),
ADEME, Service Agriculture et Forêts,
20 avenue du Grésillé, BP 90406, 49004 ANGERS CEDEX 01
- Hubert BOIZARD (hubert.boizard@mons.inra.fr),
INRA, UR AgrolImpact,
Chaussée Brunehaut Estrées Mons, BP 50136, 80203 PERONNE CEDEX
- Jean-Paul BORDES (jp.bordes@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 PARIS
- Alain BOUTHIER (a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, Domaine expérimental du Magneraud,
17700 SAINT PIERRE D'AMILLY
- Daniel BREMOND (bremond.daniel2@wanadoo.fr),
Agriculteur, 19 rue de la gare, 04700 ORAISON
- Damien BRUN (d.brun@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Claire CHENU (claire.chenu@grignon.inra.fr), AgroParisTech, UMR ECOSYS,
Bâtiment EGER, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Jean-Pierre COHAN (jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal,
Station expérimentale de La Jaillière, 44370 LA CHAPELLE SAINT SAUVEUR
- Nathalie COLBACH (nathalie.colbach@dijon.inra.fr),
INRA, UMR 1347 Agroécologie, 17 rue de Sully, BP 86510, 21000 DIJON
- Jérôme CORTET (jerome.cortet@univ-montp3.fr),
CEFE UMR CNRS - Université de Montpellier - Université Paul-Valéry Montpellier -
EPHE, Campus Paul-Valéry Route de Mende, 34199 MONTPELLIER Cedex 5

- Isabelle COUSIN (isabelle.cousin@orleans.inra.fr),
INRA, UR SOLS, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON,
45075 ORLEANS Cedex 2
- Yoahn DELAGE (yoahn.delage@wanadoo.fr),
Agriculteur, Route de Flamenac, 16110 PRANZAC
- Bassem DIMASSI (Bassem.Dimassi@laon.inra.fr),
INRA, UR AgrolImpact, Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes,
02000 BARENTON BUGNY
- Baptiste DUBOIS (b.dubois@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Gilles ESCHENBRENNER (g.eschenbrenner@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal Station Inter-Instituts, 6, Chemin de la Cote Vieille,
31450 BAZIEGE
- Patricia GARNIER (pgarnier@grignon.inra.fr)
INRA, UMR ECOSYS, Bâtiment EGER, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Mickaël HEDDE (mickael.hedde@versailles.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS, Route de Saint Cyr, 78026 VERSAILLES CEDEX
- Stéphane JEZEQUEL (s.jezequel@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, Chambre d'Agriculture, Avenue Charles Richaud,
04700 ORAISON
- Jérôme LABREUCHE (j.labreuche@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- François LAURENT (f.laurent@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Nathaël LECLECH (nathael.leclech@lorraine.chambagri.fr),
Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine, BAT I - 9 rue de la Vologne, BP 1022,
54520 LAXOU
- Vincent LECOMTE (lecomte@cetiom.fr),
CETIOM, Station Inter-Instituts, 6 Chemin de la Côte Vieille, 31450 BAZIEGE
- Christian LONGUEVAL (christian.longueval@mp.chambagri.fr),
Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées, 24 Chemin de Borde Rouge,
Auzeville Tolosane, BP 22107, 31321 CASTANET TOLOSAN CEDEX
- Laure MAMY (laure.mamy@versailles.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS, Route de Saint Cyr, 78026 VERSAILLES CEDEX
- Michel MARTIN (m.martin@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, 2 Chaussée Brunehaut, CS 30200 ESTREES MONS,
80208 PERONNE Cedex
- Bruno MARY (bruno.mary@laon.inra.fr),
INRA, UR AgrolImpact, Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes,
02000 BARENTON BUGNY

- Joséphine PEIGNE (jpeigne@isara.fr),
ISARA-Lyon, 23 rue Jean Baldassini, 69364 LYON CEDEX 07
- Céline PELOSI (celine.pelosi@versailles.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS, Route de Saint Cyr, 78026 VERSAILLES CEDEX
- Guénola PERES (guenola.peres@agrocampus-ouest.fr)
INRA Agrocampus, UMR SAS, 65, rue de St-Brieuc, CS 84215, 35042 RENNES Cedex
- Denis PIRON (pirondenis@orange.fr),
CNRS, UMR Ecobio, Campus de Beaulieu, Avenue du Général Leclerc,
35042 RENNES cedex
- Valérie POT (Valerie.Pot@grignon.inra.fr),
INRA, UMR ECOSYS, Bâtiment EGER, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
- Lionel RANJARD (ranjard@dijon.inra.fr),
INRA, UMR Agroecologie, 17 rue de Sully, BP 86510, 21065 DIJON Cedex
- Benoît REAL (b.real@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, 2 Chaussée Brunehaut, CS 30200 ESTREES MONS,
80208 PERONNE Cedex
- Sylvie RECOUS (sylvie.recous@reims.inra.fr),
INRA, UMR FARE, Centre de Recherches Agronomiques, 2 Esplanade Roland Garros,
BP 224, 51686 REIMS Cedex 2
- Patrick RETAUREAU (p.retaureau@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal, station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Guy RICHARD (Guy.Richard@orleans.inra.fr),
INRA, département Environnement Agronomie 2163 avenue de la Pomme de Pin,
CS 40001 ARDON, 45075 ORLEANS Cedex 2
- Jean ROGER-ESTRADE (estrade@grignon.inra.fr),
INRA/AgroParisTech, UMR Agronomie, Avenue Lucien Brétignières,
78850 THIVERVAL GRIGNON
- Gilles SAUZET (sauzet@cetiom.fr),
CETIOM, Domaine du Chaumoy, 18570 LE SUBDRAY
- Clotilde TOQUE (c.toque@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Catherine VACHER (c.vacher@arvalisinstitutduvegetal.fr),
ARVALIS - Institut du végétal station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE
- Jean-François VIAN (vian@isara.fr),
ISARA-Lyon, 23 rue Jean Baldassini, 69364 LYON CEDEX 07
- Laure VIEUBLE-GONOD (laure.vieuble-gonod@agroparistech.fr),
AgroParisTech, UMR ECOSYS, bâtiment EGER, 78850 THIVERVAL GRIGNON
- Cécile VILLENAVE (cecile.villeneuve@elisol-environnement.fr),
ELISOL environnement, bat 12, avenue de la Gaillarde, 2 place Viala,
34060 MONTPELLIER cedex 2

Edition, Mise en page
Service Communication-Marketing
ARVALIS - Institut du végétal

Le travail du sol est l'un des leviers majeurs pour concevoir des systèmes de culture adaptés aux nouveaux défis de l'agriculture. Les résultats agronomiques, la maîtrise des coûts de production, les performances énergétique et environnementale, les impacts sur les émissions de gaz à effet de serre et sur le stockage du carbone, la préservation de la biodiversité dépendent pour partie du travail du sol. Ressource rare, le sol, est considéré par certains comme un support de production, et par d'autres comme un milieu de vie à préserver à tout prix. Ces deux points de vue conduisent à des choix de travail du sol différents, voire opposés. Afin d'argumenter ces points de vue, sinon d'arbitrer entre eux, cet ouvrage renseigne sur les impacts des modalités de travail du sol (labour, travail superficiel, strip till, semis direct) sur les états du sol et leurs évolutions, et sur les conséquences pour le milieu environnant.

Cet ouvrage valorise les travaux les plus récents sur ce sujet. Il a été rédigé par un ensemble d'experts, scientifiques et praticiens, œuvrant à l'amélioration ou à la conception des techniques de travail du sol destinées à des systèmes de culture visant la multiperformance. L'introduction présente l'importance du travail du sol et la diversité des techniques. Puis, sont décrits les effets de ces techniques sur la mise en place des cultures, la structure du sol, les flux d'azote, le stockage du carbone, l'activité biologique, ainsi que sur la maîtrise des adventices et des transferts de produits phytosanitaires. Ensuite, sont exposées des innovations, notamment deux techniques en essor, le strip till et le semis direct sur couvert végétal. Enfin, une analyse systémique des effets du travail du sol sur la performance des systèmes cultivés est développée à partir de références acquises dans des essais de longue durée.

Cet ouvrage s'adresse particulièrement aux professionnels de l'agriculture, aux décideurs, aux étudiants et aux enseignants en agronomie.

Jérôme Labreuche est ingénieur au pôle Agronomie d'Arvalis-Institut du végétal.

François Laurent est responsable du service Agronomie, Économie, Environnement chez Arvalis-Institut du végétal.

Jean Roger-Estrade est professeur d'Agronomie à AgroParisTech.

En couverture : travail du sol en bandes avec un strip tiller. © Damien Brun



ARVALIS
Institut du végétal

éditions
Quæ

Éditions Cired, Ifremer, Inra, Inrae
www.quae.com

35 €

ISBN : 978-2-7592-2193-6



ISSN : 1952-1251
Réf. : 02463